



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HANNANOORA JUNTILA  
PIENTALOJEN PUURAKENTEISTEN TUULETTUVIEN  
YLÄPOHJIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa  
8. lokakuuta 2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

**JUNTILA, HANNANOORA:** Pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteustekninen toiminta

Diplomityö, 106 sivua, 13 liitesivua

Toukokuu 2015

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: puurakenteinen yläpohja, puurakenteinen tasakatto, toimintakriteeri, homeen kasvu, kosteuden kondensoituminen, sisäinen konvektio, kosteusvuoto

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää pientalojen puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa laskennallisesti tietokonemallinnuksen avulla. Tarkasteltavina rakenteina oli kaksi harjakatto- ja kolme tasakattoyläpohjaa. Tavoitteena oli tarvittaessa tehdä rakenteisiin niiden rakennusfysikaalista toimintaa parantavia muutoksia. Tutkimuksessa tarkasteltiin ideaalisesti toimivien rakenteiden lisäksi tilanteita, joissa rakenteisiin kohdistui ylimääräistä kosteuskuormitusta sade- ja ilmavuotojen seurauksena.

Toimintakriteereiksi valittiin homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen sekä sisäinen konvektio lämmöneristekerroksessa. Homeen kasvua tutkittiin VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän parannetun homemallin avulla, ja homeindeksin raja-arvoksi asetettiin  $M_{\max} \leq 1,0$ . Suhteellisen kosteuden raja-arvoksi määritettiin  $RH_{\max} \leq 98 \%$ . Sisäistä konvektiota rajoitettiin valitsemalla muunnetun Rayleighin luvun raja-arvoksi  $Ra_m \leq 5$ . Rakenteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteet selvitettiin muodostamalla 2-ulotteiset laskentamallit Delphin 5.8.1 -laskentaohjelmaan ja simuloimalla kunkin rakenteen toimintaa kahden vuoden ajan. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Jokioisen vuosien 2004 ja 2050 ilmastoa kuvaavia rakennusfysikaalisia testivuotia. Sisäilman lämpötila oli  $20^\circ\text{C}$  ja kosteuslisä  $2 \dots 5 \text{ g/m}^3$  ulkoilmaan nähden. Harjakattorakenteissa käytettiin ilmanvaihtokertoimena  $0,5 \text{ 1/h}$  ja tasakatoissa  $0,2 \text{ 1/h}$ . Sadevuotona käytettiin  $1 \%$ :a sateen kokonaismäärästä ja ilmavuodon sisätilasta rakenteeseen mallinnettiin tapahtuvan  $1 \text{ mm}$  levyisen raon kautta  $5 \text{ Pa}$ :n paine-erolla.

Kaikki tasakattorakenteet todettiin toimiviksi nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, kun niissä ei esiintynyt kosteusvuotoja. Vuotamattomat harjakattorakenteet korjattiin toimiviksi lisäämällä lämmöneristettä aluskatteen alapuolelle. Ilmastomuutos heikensi olosuhteita enemmän harjakatoissa kuin tasakatoissa. Kosteusvuodot heikensivät kaikkien rakenteiden toimintaa: ilmavuoto erityisesti lähellä rakenteen sisäpintaa ja sadevuoto rakenteen ulko-osassa aiheuttaen jopa erittäin runsasta homekasvua lämmöneristekerroksen kylmällä puolella. Vähemmän tuulettuvien tasakattojen toiminta heikkeni kosteusrasituksen kasvaessa vielä enemmän kuin harjakattojen. Ilmanvaihtuvuuden todettiin vaikuttavan ratkaisevasti kaikkien rakenteiden toimintaan. Laskentatulosten perusteella yläpohjarakenteet on erittäin tärkeää suunnitella ja toteuttaa siten, että vuodoilta välttyttäisiin. Lisäksi yläpohjien  $400\text{--}500 \text{ mm}$  paksut puhalluseristekerrokset olisi korvattava sideaineellisella puhalluseristeellä tai levyeristeen ja sideaineettoman puhalluseristeen yhdistelmällä, jotta sisäisestä konvektiosta ei aiheutuisi haittaa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

**JUNTILA, HANNANOORA:** Hygrothermal performance of ventilated timber roofs in detached houses

Master of Science Thesis, 106 pages, 13 Appendix pages

May 2015

Major: Construction Engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: timber roof, wooden flat roof, performance criterion, mould growth, moisture condensation, internal convection, moisture leakage

The aim of this research was to investigate the hygrothermal performance of ventilated timber roofs in detached houses using computer modelling. Two different ridge roofs and three flat roofs were examined. When necessary, the aim was to change the structures to improve their hygrothermal performance. Besides ideal structures, roofs exposed to extra moisture load due to rain and air leakages were studied.

The performance of the structures was evaluated by the following computational criteria: mould growth, moisture condensation and internal convection in thermal insulation layer. Mould growth was investigated by improved mould growth model developed by VTT and TUT, and the maximum mould growth index was limited to  $M_{\max} \leq 1,0$ . The maximum relative humidity was limited to  $RH_{\max} \leq 98\%$ . The internal convection was restricted by limiting the modified Rayleigh number to  $Ra_m \leq 5$ . Hygrothermal conditions inside the structures were examined by forming two-dimensional calculation models of the structures using Delphin 5.8.1 calculation program and simulating the performance of each structure for a two-year period. Data describing the climate in Jokioinen in 2004 and 2050 was used as outdoor conditions in the calculations. The indoor air temperature was 20 °C constantly and the additional moisture content was 2..5 g/m<sup>3</sup> compared to the outdoor air. For ridge roofs the air change rate used was 0,5 1/h and for flat roofs 0,2 1/h respectively. 1 % of the total amount of rain was used to simulate a rain leakage through the roofing. An air leakage from inside the building into the structure was modelled to occur through a 1 mm wide slit the pressure difference being 5 Pa.

Each of the flat roof structures were found to perform sufficiently in the present and future climate when there were no moisture leakages in the structure. Respectively, all ridge roofs became acceptable after adding thermal insulation beneath the underlay. The hygrothermal conditions inside the ridge roofs were more impaired due to the climate change than the conditions inside the flat roofs. Moisture leakages impaired the performance of all the structures studied: the air leakage particularly close to the inner surface of the structure and the rain leakage in outer part of the structure causing even abundant mould growth on the cold side of the thermal insulation layer. The less ventilated flat roofs were even more affected by the increase of the moisture load than the ridge roofs. Ventilation was found to have a decisive impact on the performance of all the roof structures. Based on the calculation results, it is essential to design and build roof structures so that moisture leakages would be avoided. In addition, the 400–500 mm thick in-situ formed loose-fill insulations in roof structures should be replaced with products containing a binding agent or with a combination of insulation board and in-situ formed loose-fill insulation in order to avoid disadvantages caused by internal convection.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella vuoden 2014 aikana osana Honkarakenne Oyj:n laajempaa hirsirakenteisten pientalojen rakenteiden tutkimus- ja kehitysprojektia. Työn ohjaajana ja tarkastajana toimi professori Juha Vinha rakennustekniikan laitokselta.

Kiitän Juha Vinhaa mielenkiintoisen diplomityöaiheen tarjoamisesta ja valmiin työn tarkastamisesta. Kiitos Anssi Laukkariselle saamastani opastuksesta laskentaohjelmiston käyttöön liittyen. Esitän kiitokset myös muille TTY:n rakennusfysiikan tutkimusryhmään kuuluville henkilöille osallistumisesta tutkimusprojektin eri vaiheisiin. Erityinen kiitos kuuluu työkaverilleni Joonas Saloselle korvaamattomasta vertaistuesta ja kaikista matkan varrella käydyistä toivottavasti molempien diplomitöitä edistäneistä keskusteluista.

Lopuksi tahdon kiittää vanhempiani ja muita läheisiäni saamastani henkisestä tuesta, arvostuksesta ja työrauhasta tämän diplomityöprosessin ja koko opiskeluni aikana. Tässä vaiheessa on helppo hymyillen todeta, että lopputulos on sittenkin kaiken vuosien aikana tehdyn työn arvoinen!

Kokkolassa 24.5.2015

Hannanoora Junttila

## SISÄLLYS

|   |      |
|---|------|
| Merkinnät .....   | vii  |
| Termit ja lyhenteet .....                               | viii |
| 1 Johdanto .....  | 1    |
| 1.1 Tutkimuksen tausta ja aihepiiri .....               | 1    |
| 1.2 Tutkimuksen sisältö ja tavoitteet.....              | 2    |
| 1.3 Tutkimusmenetelmät.....                             | 3    |
| 1.4 Tutkimuksen rajaukset .....                         | 3    |
| 2 Puurakenteiset yläpohjat .....                        | 5    |
| 2.1 Yläpohjan rakenne .....                             | 5    |
| 2.2 Yläpohjien kehittyminen ja havaitut ongelmat .....  | 8    |
| 2.3 FRAME:n yläpohjarakenteita koskevat tulokset .....  | 12   |
| 3 Teoria .....  | 16   |
| 3.1 Lämmön siirtyminen .....                            | 16   |
| 3.1.1 Johtuminen .....                                  | 16   |
| 3.1.2 Konvektio.....                                    | 19   |
| 3.1.3 Säteily.....                                      | 22   |
| 3.2 Kosteuden siirtyminen .....                         | 24   |
| 3.2.1 Kosteuslähteet .....                              | 25   |
| 3.2.2 Kosteus materiaalissa .....                       | 27   |
| 3.2.3 Vesihöyryn diffuusio.....                         | 29   |
| 3.2.4 Kosteuden konvektio.....                          | 32   |
| 3.2.5 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen .....         | 33   |
| 3.3 Ilma- ja kosteusvuodot .....                        | 36   |
| 3.4 Suomen ilmasto ja ilmastomuutos .....               | 37   |
| 4 Homehtuminen.....                                     | 40   |
| 4.1 Homeen kasvu ja sen aiheuttamat haitat .....        | 40   |
| 4.2 VTT:n ja TTY:n kehittämä parannettu homemalli ..... | 41   |
| 5 Rakenteiden toimivuuden kriteerit.....                | 47   |
| 5.1 Rakennusfysikaalisen suunnittelun tavoitteet .....  | 47   |
| 5.2 Yläpohjia koskevat määräykset ja ohjeet.....        | 48   |
| 5.3 Tutkimuksessa käytettävät toimintakriteerit .....   | 51   |
| 5.3.1 Homeindeksi .....                                 | 52   |
| 5.3.2 Kosteuden kondensoituminen .....                  | 53   |
| 5.3.3 Muunnettu Rayleighin luku .....                   | 54   |
| 6 Laskennallinen tarkastelu.....                        | 55   |
| 6.1 Analysointimenetelmä.....                           | 55   |
| 6.2 Laskentaohjelma .....                               | 57   |
| 6.3 Rakenteiden mallintamisen periaate .....            | 58   |
| 6.4 Materiaaliominaisuudet.....                         | 59   |
| 6.5 Olosuhteet .....                                    | 59   |
| 6.6 Ilma- ja sadevuotojen mallintaminen .....           | 60   |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7     | Laskennan tulosten tarkastelu .....                  | 62  |
| 7.1   | Homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen .....     | 62  |
| 7.1.1 | Harjakattorakenne YP1 .....                          | 63  |
| 7.1.2 | Korjattu harjakattorakenne YP1_K.....                | 65  |
| 7.1.3 | Harjakattorakenne YP2 .....                          | 66  |
| 7.1.4 | Korjattu harjakattorakenne YP2_K.....                | 69  |
| 7.1.5 | Tasakattorakenne puukuitueristeellä TK1_1.....       | 70  |
| 7.1.6 | Tasakattorakenne polyuretaanieristeellä TK1_2.....   | 72  |
| 7.1.7 | Viherkattorakenne polyuretaanieristeellä TK2_1 ..... | 74  |
| 7.1.8 | Viherkattorakenne puukuitueristeellä TK2_2 .....     | 76  |
| 7.1.9 | Terassikattorakenne TK3 .....                        | 78  |
| 7.2   | Ilmanvaihtuvuuden merkitys.....                      | 80  |
| 7.3   | Hygroskooppisen materiaalin merkitys.....            | 85  |
| 7.4   | Muunnettu Rayleighin luku .....                      | 87  |
| 7.5   | Laskentatulosten vertailu .....                      | 90  |
| 7.6   | Virhearvio .....                                     | 95  |
| 8     | Yhteenveto ja johtopäätökset .....                   | 98  |
|       | Lähteet.....   | 102 |
|       | Liitteet .....                                       | 106 |

## MERKINNÄT

|               |                                    |   |
|---------------|------------------------------------|---|
| $\delta_v$    | vesihöyrynläpäisevyys              | $m^2/s$                                 |
| $\varepsilon$ | emissiviteetti                     | -                                       |
| $k_a$         | ilmanläpäisevyys                   | $m^3/(m \cdot s \cdot Pa)$              |
| $\lambda$     | lämmönjohtavuus                    | $W/(m \cdot K)$                         |
| $\mu$         | vesihöyryyn diffuusiovastuskerroin | -                                       |
| $v$           | vesihöyrypitoisuus                 | $kg/m^3, g/m^3$                         |
| $\rho$        | tiheys                             | $kg/m^3$                                |
| $\sigma$      | Stefan-Boltzmannin säteilylvakio   | $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ |
| $\phi$        | ilman suhteellinen kosteus         | % RH                                    |
| $\Phi$        | lämpövirta                         | W                                       |
| $c$           | ominaislämpökapasiteetti           | $J/(kg \cdot K)$                        |
| $d$           | paksuus                            | m                                       |
| $g$           | kosteusvirran tiheys               | $kg/(m^2 \cdot s)$                      |
| $g$           | putoamiskiihtyvyys                 | $9,81 m/s^2$                            |
| $n$           | ilmanvaihtokerroin                 | 1/h                                     |
| $p$           | paine                              | Pa                                      |
| $q$           | lämpövirran tiheys                 | $W/m^2$                                 |
| $s_d$         | suhteellinen diffuusiovastus       | m                                       |
| $t$           | aika                               | s, h, d, a                              |
| $w$           | kosteuspitoisuus                   | $kg/m^3$                                |
| $A$           | pinta-ala                          | $m^2$                                   |
| $A_w$         | kapillariteettikerroin             | $kg/(m^2 \cdot s^{1/2})$                |
| $G$           | kosteusvirta                       | $kg/s$                                  |
| $L$           | pituus, paksuus                    | m                                       |
| $M$           | homeindeksi                        | -                                       |
| $R$           | lämmönvastus                       | $m^2 \cdot K/W$                         |
| $Ra_m$        | muunnettu Rayleighin luku          | -                                       |
| $T$           | lämpötila                          | $^{\circ}C, K$                          |
| $U$           | lämmönläpäisykerroin               | $W/(m^2 \cdot K)$                       |
| $Z_v$         | vesihöyrynvastus                   | s/m                                     |

|       |   |
|-------|---|
| FRAME | Future envelope assemblies and HVAC solutions |
| HHL   | homehtumisherkkyyssluokka                     |
| HTL   | homekasvun taantumaluokka                     |
| TTY   | Tampereen teknillinen yliopisto               |
| VTT   | Teknologian tutkimuskeskus VTT                |

## TERMIT JA LYHENTEET

|                  |   |
|------------------|---|
| Diffuusio        | Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuus-eroja (tai osapaine-eroja). Diffuusiassa kaasu siirtyy korkeammasta pitoisuudesta alemmaa pitoisuutta kohten.   |
| Homeindeksi      | Homeindeksi (M) kuvaa tarkasteltavan materiaalin pinnalla esiintyvien homeiden peittämää pinta-alaa suhteessa pinnan koko alaan näköhavaintoon perustuen. Indeksillä vaihtelee välillä 0–6. Indeksia määritettäessä ei erotella eri homelajeja toisistaan.  |
| Hygrokalvo       | Hygrokalvo on muovipohjainen höyrynsulkukalvo, jonka vesihöyrynvastus riippuu ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta. Hygrokalvon vesihöyrynvastus pienenee merkittävästi ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden noustessa lähelle 100 % RH:ta.   |
| Hygroσκοoppisuus | Hygroσκοoppisuus tarkoittaa huokoisen aineen kykyä sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan.  |
| Höyrynsulku      | Höyrynsulku on ainekerros, jonka pääasiallisena tehtävänä on estää vesihöyryä haitallinen diffuusio rakenteeseen tai rakenteessa.   |
| Ilmanläpäisevyys | Ilmanläpäisevyys ( $k_a$ ) ilmoittaa ilman tilavuuden, joka stationääritilassa laminaarisena virtauksena läpäisee kohtisuorasti pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun kerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.  |
| Johtuminen       | Johtumisessa lämpöenergia siirtyy aineen molekyylien välityksellä tapahtuvan sisäisen värähtelyn vaikutuksesta korkeammasta lämpötilasta matalampaan ilman aineen nettoliikettä.  |
| Kapillaarisuus   | Kapillaarisuus tarkoittaa huokoisen materiaalin kykyä imeä ja siirtää vettä huokosverkostossa esiintyvien kapillaarivoimien vaikutuksesta. Vesi siirtyy huokosverkostossa eteenpäin vesipinnalla vaikuttavan kapillaari-imupaineen ansiosta. Pystysuuntainen kosteuden kapillaarinen siirtyminen lakkaa, kun huokosputkessa olevan veden synnyttämä painovoima on tasapainossa kapillaari-imuvoiman kanssa. |



|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Kondensoituminen                | Kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisällä tai pinnalla vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa kyllästyskosteuspitoisuuden ( $\varphi = 100 \% \text{ RH}$ ).  |
| Konvektio                       | Konvektio syntyy, kun kaasu tai neste virtaa ulkopuolisen voiman tai lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen vaikutuksesta. Lämpö ja vesihöyry siirtyvät konvektiolla virtaavan ilman mukana.   |
| Lämmönjohtavuus                 | Lämmönjohtavuus ( $\lambda$ ) ilmoittaa lämpömäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen lämpötilaero on yksikön suuruinen.   |
| Rakennusfysikaalinen testivuosi | Rakennusfysikaalisella testivuodella tarkoitetaan yhden vuoden ajanjaksolla tietyllä paikkakunnalla toteutuneita ulkoilman olosuhteita, jotka vastaavat 30 vuoden tarkastelujaksolla vähintään noin 90 % kriittisyystasoa arvioitaessa vaipparakenteiden lämpö- tai kosteusteknistä toimintaa tietyn toimintakriteerin perusteella. Samoja testivuosia voidaan käyttää koko Suomen alueella.  |
| Sisäinen konvektio              | Sisäinen konvektio tarkoittaa konvektiovirtausta ilmaa läpäisevän materiaalin sisällä. Sisäinen konvektio on yleensä lämpötilaeroista johtuvaa luonnollista konvektiota, mutta se voi sisältää myös tuulen aiheuttamaa pakotettua konvektiota.  |
| Säteily                         | Lämpösäteilyllä tarkoitetaan lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisina aaltolina tai fotoneina kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä. Lämpösäteilyä syntyy, kun aineen atomeissa ja molekyyleissä olevien elektronien paikat vaihtuvat. Lämpösäteily voidaan jakaa pitkä- ja lyhytaaltoiseen säteilyyn. Kaikki aineet ja materiaalit lähettävät pitkäaaltoista lämpösäteilyä, kun niiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Hehkuvan kuumat kappaleet, kuten aurinko, lähettävät myös lyhytaaltoista lämpösäteilyä, josta osa on näkyvän valon aallonpituusalueella. |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Toimintakriteeri      | Rakenteen tai koko rakennuksen toimintaan liittyvä ilmiö tai asia, jolla on vaikutusta rakenteen tai rakennuksen turvallisuuteen, terveellisyyteen, ympäristöystävällisyyteen, esteettisyyteen tai taloudellisuuteen. Usein toimintakriteerit kuvaavat erilaisia rakenteiden vaurioitumistapoja ja -ilmiöitä, kuten homeen kasvu, kosteuden kondensoituminen, rakenteiden halkeilu tai muodonmuutokset, mutta toimintakriteerinä voi olla myös esimerkiksi rakennuksen sisäilman laatu tai rakennuksen energiankulutus. |
| Vesihöyrynläpäisevyys | Vesihöyrynläpäisevyys ( $\delta_v$ ) ilmoittaa vesihöyrymäärän, joka stationääritilassa läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen, kun vesihöyrypitoisuusero kerroksen eri puolilla on yksikön suuruinen.   |

# 1 JOHDANTO

Tässä luvussa perehdytään lyhyesti diplomityön aihepiiriin ja sen taustalla olevaan tutkimusprojektiin sekä esitellään tutkimuksen tavoitteet ja asioiden käsittelyjärjestys seuraavissa luvuissa. Lopuksi kuvaillaan käytettyjä tutkimusmenetelmiä ja määritellään tutkimuksen rajaukset.

## 1.1 Tutkimuksen tausta ja aihepiiri

Yläpohja – vesikatteen, kantavien rakenteiden ja eristeiden muodostama kokonaisuus – on olennainen osa jokaista pientaloa. Yhdessä seinien ja alapohjan kanssa se suojaa rakennuksen käyttäjiä ulkoilman olosuhteilta, kuten sateelta, pakkaselta ja tuulelta. Nykyaikaisen yläpohjan on paitsi pidettävä allaan olevat sisätilat sopivan lämpiminä ja kuivina, myös pysyttävä itsessään riittävän kuivana, jotta rakennus säilyisi käyttökelpoisena, terveellisenä ja viihtyisenä koko suunnitellun elinkaarensa ajan. Samaan aikaan yläpohjia vaaditaan eristettäväksi yhä paksummilla lämmöneristekerroksilla, jotta talojen lämmitysenergiaa ei kuluisi hukkaan. Näiden kaikkien vaatimusten yhtäaikainen toteuttaminen ei ole täysin ongelmaton. Yläpohjarakenteita on tarkasteltava kokonaisuutena, jotta voitaisiin varmistua niiden lämpö- ja kosteusteknisestä turvallisuudesta ja toimintavarmuudesta.

Tämä diplomityö käsittelee suomalaisissa pientaloissa käytettävien puurakenteisten yläpohjien lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Toimintaa tarkastellaan rakennuksen terveellisyyden ja viihtyisyyden sekä itse yläpohjarakenteiden kosteusteknisen turvallisuuden kannalta. Tutkimuksen tilaaja on suomalainen, hirsirakenteisia puutaloja valmistava Honkarakenne Oyj. Diplomityö on osa Honkarakenteen laajempaa tutkimus- ja kehitysprojektia, jonka tavoitteena on parantaa hirsitalojen rakennusfysikaalista toimintaa ja kosteusteknistä turvallisuutta. Tutkimusprojektin yhteydessä tutkitaan monipuolisesti hirsirakenteisen pientalon vaipan rakenteita ja liitoksia, joista tämä diplomityö käsittelee ainoastaan yläpohjarakenteita.

Diplomityö pohjautuu aiemmin TTY:llä samasta aihepiiristä tehtyjen tutkimusten tuloksiin, joista keskeisimpinä voidaan mainita vuonna 2013 valmistuneen laajan FRAME-projektin tulokset (Vinha et al. 2013). FRAME:ssa tutkittiin erilaisten yläpohja-, alapohja- ja seinärakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja toiminnassa tapahtuvia muutoksia, jotka aiheutuvat toisaalta ennustetusta ilmastomuutoksesta ja toisaalta kiristyvistä rakennusten energiatehokkuusvaatimuksista. FRAME:n tulokset osoittavat nykyisten tuulettuvien yläpohjarakenteiden kosteusteknisen toimivuuden heikentyvän tulevaisuuden ilmastossa ellei niihin tehdä parannuksia. Myös lämmöneristepaksuuksien kasvattaminen vaikuttaa rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimivuuteen samansuuntaisesti

kuin ilmastonmuutos lisäten muun muassa homeen kasvulle sopivien olosuhteiden esiintymistä rakenteissa ja heikentäen vaipparakenteiden vikasietoisuutta. Tässä tutkimuksessa yläpohjarakenteiden toimintaa tutkitaan pääosin FRAME:ssa käytettyjen tarkasteluperiaatteiden mukaisesti.

## 1.2 Tutkimuksen sisältö ja tavoitteet

Tutkimuksen keskiössä ovat Honkarakenne Oyj:n pientaloissaan käyttämät yläpohjarakenteet. Tutkimuksella halutaan saada tietoa siitä, ovatko nämä rakenteet Suomen ilmastossa terveellisiä ja turvallisia lämpö- ja kosteusteknisestä näkökulmasta nykyisissä ja tulevaisuuden olosuhteissa. Tutkimuksessa tarkastellaan sekä puurakenteisia harjakattoja että vähemmän tuulettuvia puurakenteisia tasakattoja, joista tarkasteltavina ovat myös viherkatto- ja terassikattorakenne.

Tutkimuksen tavoitteena on aluksi luoda tarkasteltavien rakenteiden toimivuudelle kriteerit ja raja-arvot. Näiden kriteerien pohjalta tutkitaan tiettyjen Honkarakenteen käyttämien yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa ja kehitetään rakenteita tarpeen vaatiessa niin, että ne täyttävät asetetut kriteerit. Toisena tavoitteena on selvittää samojen rakenteiden toimivuutta tilanteessa, jossa rakenteissa esiintyy sade- tai ilma- vuotoja.

Työn alussa, luvussa 2, esitellään pääpiirteittäin suomalaisten pientalojen vesikatto- ja yläpohjarakenteiden kehitysvaiheita 1950-luvulta nykypäivään ja yläpohjissa eri aikoina esiintyneitä ongelmia. Lisäksi esitetään FRAME-tutkimuksen tuulettuvien yläpohjarakenteiden tuloksia, joihin tämän tutkimuksen tuloksia tullaan myöhemmin vertaamaan. Luku 3 sisältää laskentatarkastelujen perustana olevaa lämmön- ja kosteudensiirron teoriaa sekä tietoa rakenteissa esiintyvistä kosteusvuodoista ja Suomen ilmastosta nykyhetkellä ja tulevaisuudessa. Luvussa 4 kerrotaan homeen kasvusta ja sen kuvaamiseksi kehitetystä matemaattisesta mallista sekä haitoista, joita homeen kasvu voi aiheuttaa. Luvussa 5 käsitellään ensin rakenteiden rakennusfysikaalisen suunnittelun tavoitteita yleisellä tasolla. Sitten perehdytään Suomessa käytössä oleviin yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa koskeviin määräyksiin ja ohjeisiin. Lopuksi luvussa 5 esitellään tämän tutkimusprojektin yhteydessä määritellyt kriteerit, joiden perusteella seuraavissa luvuissa arvioidaan, onko rakenne rakennusfysikaalisesti toimiva.

Luvussa 6 käsitellään lyhyesti tutkimuksessa käytettyä analysointimenetelmää ja laskentaohjelmistoa ja esitellään tutkittaville rakenteille tehtyjen laskennallisten tarkastelujen periaatteita ja tarkastelujen toteutustapaa. Tarkasteltavat rakenteet ja laskennallisten tarkastelujen tulokset esitetään luvussa 7. Luvussa 7 myös verrataan tämän tutkimuksen tuloksia FRAME:n tutkimustuloksiin ja otetaan lopuksi kantaa saatujen tutkimustulosten luotettavuuteen. Luvussa 8 esitetään yhteenveto tutkimuksesta ja sen keskeiset tulokset sekä niistä tehtävissä olevat päätelmät ja suositukset.

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen alkuvaiheessa määritettiin aiempaan tutkimustietoon perustuen ne toimintakriteerit, joiden perusteella rakenteiden toimivuutta tässä tutkimuksessa arvioitiin. Toimintakriteerien määrittäminen tehtiin TTY:n rakennusfysiikan asiantuntijoista muodostetun ryhmän toimesta. Asiantuntijaryhmään kuuluivat Juha Vinha, Anu Aaltonen, Anssi Laukkarinen, Petteri Huttunen, Marko Kiili ja Eero Tuominen. Kriteerien määrittämisen jälkeen rakenteiden toimintaa tutkittiin laskennallisesti ja saatuja tuloksia verrattiin asetettuihin kriteereihin. Osaa valituista toimintakriteereistä tutkittiin käsin laskeiden ja osaa tietokonemallinnukseen perustuen. Mikäli alkuperäinen rakenne ei täyttänyt kaikkia asetettuja kriteereitä, siihen tehtiin tarvittavat muutokset ja korjaukset siten, että kriteerit lopulta täyttyivät. Ideaalisella tavalla toimivien, ehjien rakenteiden lisäksi tutkittiin tapauksia, joissa rakenteissa esiintyi sade- tai ilmavuotoja.

Tietokonemallinnus tehtiin tutkittaville rakenteille sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Mallinnukseen käytettiin Delphin 5.8.1 -laskentaohjelmaa, joka on tarkoitettu rakenteiden lämpötila- ja kosteusolosuhteiden laskentaan muuttuvissa olosuhteissa. Sen avulla pystytään tarvittaessa tarkastelemaan myös rakennekerroksen läpi tapahtuvaa ilmavirtausta ja rakenteen tuulettumista. Delphinistä saatiin tuloksena rakenteessa kul- lakin ajanhetkellä vallitsevat lämpötila- ja kosteusjakaumat, joita käytettiin rakenteen toiminnan analysoimiseen.

Rakenteiden toimintaa analysoitiin TTY:llä pitkään kehitetyllä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmällä. Menetelmä ottaa huomioon rakenteiden toiminnan kannalta kriittiset sisä- ja ulkoilman olosuhteet, materiaalien keskeiset rakennusfysikaaliset ominaisuudet, käytettävien laskentaohjelmien ominaisuudet sekä erilaiset rakenteiden toimintakriteerit. Analysointimenetelmää on kuvailtu laajemmin ja yksityiskohtaisemmin lähteessä Vinha et al. (2013). Toisena keskeisenä apuvälineenä tutkimuksessa käytettiin VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämää parannettua homemallia. Parannetun homemallin avulla Delphin-ohjelmasta tuloksena saatujen lämpötila- ja kosteusjakaumien perusteella voitiin arvioida, esiintyykö rakenteessa homeen kasvulle otollisia olosuhteita.

Tässä diplomityössä tehtyjen tarkastelujen ja niistä saatujen tulosten perusteella on vielä tutkimusprojektin myöhemmässä vaiheessa tarkoitus tehdä tutkimuksen tilaajalle puu- rakenteisten tasakattojen tarkempaa suunnittelua varten erillinen ohje.

### 1.4 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa tarkastellut rakenteet olivat tutkimuksen tilaajan suunnitteleamia ja valitsemia. Tarkoituksena ei ollut tarkastella kaikkia suomalaissa pientaloissa yleisesti käytettäviä yläpohjarakenteita. Tutkimukseen ei sisällynyt myöskään mittauksia todellisissa

rakennuksissa tai muuta kokeellista osiota, vaan tulokset pohjautuivat ainoastaan valittujen rakenteiden laskennalliseen tarkasteluun.

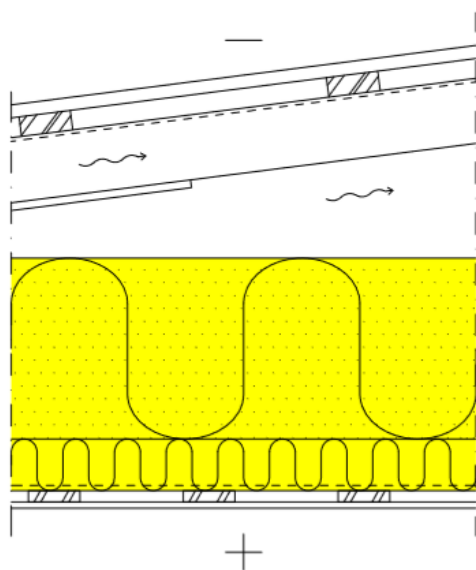
Tarkasteluissa ei otettu huomioon yläpohjien rakennusaikaista toimintaa, vaan rakenteiden toimivuutta tutkittiin ainoastaan rakennuksen käytön aikana vakiintuneissa olosuhteissa. Mahdollisen rakennuskosteuden vaikutusta rakenteen toimintaan ei siis tutkittu. Jotta laskentatarkastelujen määrä olisi pysynyt kohtuullisena, vuotavia rakenteita tarkasteltiin vain nykyilmastossa. Vuototarkasteluilla pyrittiin selvittämään, kuinka paljon kosteusvuoto heikentää rakenteen toimintaa vuotamattomaan rakenteeseen verrattuna. Vuotavia rakenteita ei siis pyritty korjaamaan rakenneratkaisuja muuttamalla, jos vastaava vuotamaton rakenne todettiin toimivaksi. Perusteena tähän oli se, että huolellisesti toteutetuissa rakenteissa ei lähtökohtaisesti pitäisi esiintyä ilma- eikä kosteusvuotoja.

## 2 PUURAKENTEISET YLÄPOHJAT

Luvussa 2.1 kuvataan Suomessa yleisesti käytettävän puurakenteisen ristikkoyläpohjan rakenne ja sen eri rakennekerrosten pääasialliset tehtävät ja toimintatavat. Tämän jälkeen luvussa 2.2 käsitellään eri vuosikymmenillä rakennettujen pientalojen tyypillisiä yläpohjarakenteita ja niissä havaittuja ongelmia. Luku 2.3 sisältää keskeisimmät FRAME-tutkimuksen tuulettuvien yläpohjarakenteiden toimintaa koskevat tulokset.

### 2.1 Yläpohjan rakenne

Yläpohja koostuu useista kerroksista, joista jokaisella on oma tehtävänsä rakenteen kantavuuden tai lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden toteutumisessa. Tuulettuva, puurakenteinen yläpohja koostuu kuvan 2.1 esittämällä tavalla tyypillisesti vesikatteesta alusrakenteineen, aluskatteesta, kantavista puurakenteista, tuulettustilasta, lämmöneristekerroksesta, höyrynsulusta ja sisäverhouksesta koolauksineen.



**Kuva 2.1.** Pientalon tuulettuvan, puurakenteisen ristikkoyläpohjan tyypillinen rakenne (Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy, Isover).

Vesikatteen tehtävä on pitää katemateriaalista riippuen kaikki tai suurin osa sadevedestä ja lumesta yläpohjarakenteen ulkopuolella. Vesikate rakennetaan useimmiten pellistä, tiilestä tai bitumikermistä. Näistä ainoastaan bitumikermikaton on tarkoitus olla täysin vedenpitävä. Tiili- ja peltikatteiden sauma- ja liitoskohdat eivät sen sijaan tyypillisesti ole vesitiiviitä, vaikka katemateriaali itsessään ei läpäisisi vettä. Tiili- ja peltikatteen

yhteydessä käytetään tämän takia aina aluskatetta, jonka tehtävä on johtaa varsinaisen vesikatteen läpi pääsevä vesi ulkoseinälinjojen ulkopuolelle siten, että vesi ei pääse kas-telemaan talon rakenteita. Aluskate sijoitetaan lähelle vesikatetta, kuitenkin siten, että näiden kahden vettä läpäisemättömän kerroksen väliin jää riittävä tuuletusrako. Aluskatteena voidaan käyttää tiivistä muovikalvoa tai vesitiivistä mutta vesihöyryavointa kalvoa. (RIL 107–2012) Nykyisin on saatavilla myös kondenssisuojattuja aluskatteita, joiden vesitiivis yläpinta toimii kuten perinteinen muovialuskate, mutta joiden imukykyinen alapinta pystyy sitomaan pintaan tiivistyvää kosteutta ja siten tasaamaan tuuletustilan kosteusolosuhteita. Kondenssisuojatun aluskatteen käytön tarkoituksena on vähentää tuuletustilan ilmasta aluskatteen alapintaan kertyvän ja siitä lämmöneristekerrokseen tippuvan veden määrää. (RT 37917 2010)

Erityisesti puurunkoisten pientalojen yläpohjien kantavat rakenteet tehdään useimmiten puusta. Puu sopii yläpohjien rakenteisiin, koska se on kevyt, luja ja helposti työstettävä materiaali. Puun heikkoutena sitä vastoin on sen homehtumis- ja lahoamisriski kosteissa olosuhteissa, joita ulkoilmaan yhteydessä olevissa tuulettuvissa yläpohjissa väistämättä esiintyy. Puurakenteet on sen vuoksi pyrittävä pitämään riittävän lämpimissä ja kuivissa olosuhteissa niin, ettei rakennukseen pääse syntymään kosteusvaurioita. (Kaila 1997)

Yläpohjarakenteiden kuivanapito tapahtuu tuuletuksen avulla. Rakenteeseen järjestetään tuuletustila tai -väli, jonka kautta on kuljettava riittävä määrä ulkoilmaa vieden kosteutta pois rakenteesta. Ilman on vaihduttava tuuletustilassa tarpeeksi mutta ei liikaa, sillä liiallinen ilmanvaihto tuo yläpohjaan ajoittain tarpeettomasti kosteutta ulkoilmasta. Lisäksi ylimääräinen ilmavirta lisää rakenteen läpi tapahtuvia lämpöhäviöitä ja siten heikentää yläpohjan energiatehokkuutta. (RIL 107–2012) Tätä tuuletuksen ei-toivottua vaikutusta hillitään rakenteeseen asennettavilla tuulensuojalevyillä ja tuulenohjaimilla, jotka vähentävät ilmavirtausta lämmöneristekerroksessa silloin, kun eristemateriaali on ilmaa läpäisevää. Harjakattoisissa yläpohjissa, joissa tuuletustila on korkea, estetään tuulen pääsy lämmöneristekerrokseen räystäiden läheisyydessä suuntaamalla ulkoa tuleva ilmavirtaus tuulenohjainten avulla lähelle tuuletustilan yläosaa. Tasakatoilla, joissa tuuletusväli on olennaisesti matalampi ja ilma liikkuu eristekerroksen suuntaisesti, saattaa koko lämmöneristekerroksen pinta olla tarpeen peittää tuulensuojalevyllä. Tuulensuojalevynä voidaan käyttää esimerkiksi huokoista puukuitulevyä, jonka ilmanläpäisevyys on pieni, mutta joka läpäisee vesihöyryä riittävän hyvin. (RIL 107–2012)

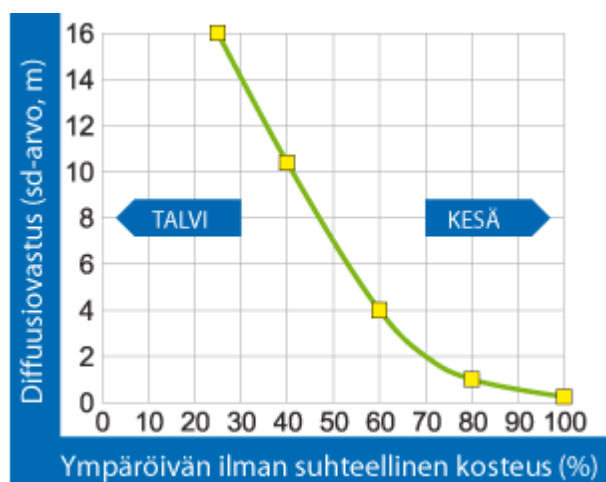
Yläpohjien lämmöneristeenä käytetään Suomessa yleisesti puukuitueristettä ja mineraalivilloja. Saatavilla on myös erilaisia muovipohjaisia lämmöneristeitä, kuten EPS- ja polyuretaanieristeitä. Puukuidusta ja mineraalivillasta valmistetaan sekä irtonaaisena asennettavia että levymäisiä tuotteita. Irtonaisten puhallusvillojen etuna on niiden helppo asennettavuus silloin, kun eristetilassa risteilee erisuuntaisia kattoristikoiden sauvoja ja muita rakenteita, jotka täytyy ympäröidä eristeellä huolellisesti. Puhalluseristeiden heikkouksia taas ovat kevyen ja sitomattoman eristemateriaalin painuminen ajan kulu-



essa sekä materiaalin suuri ilmanläpäisevyys. Eristeen ilmanläpäisevyyden merkitystä rakenteen toiminnan kannalta käsitellään myöhemmin luvuissa 3.1.2 ja 3.2.4. Levyeristeillä painuminen ja liiallinen ilmanläpäisevyys eivät ole ongelmana, mutta levyeristeiden työstäminen ja asentaminen yläpohjiin voi rakenteesta riippuen olla huomattavasti hankalampaa kuin puhalluseristeen asentaminen. (Lahdensivu et al. 2012) EPS- ja polyuretaanieristeet poikkeavat puukuitu- ja mineraalivillaeristeistä siten, että ne läpäisevät vähemmän ilmaa ja kosteutta ja saattavat tuotteesta riippuen olla lämmöneristävyydeltään parempia (Rakennustieto 2010). Esimerkiksi 500 mm puukuitueristekerroksen lämmöneristyskykyä vastaa noin 300 mm:n kerros polyuretaanieristettä. Tehokkaampaa lämmöneristemateriaalia voidaankin hyödyntää esimerkiksi silloin, kun rakenteen kokonaispaksuudesta halutaan saada pienempi. Muovipohjaisten eristeiden käyttöä rajoittaa jonkin verran tuotteiden korkeampi hinta puukuitu- ja mineraalivillaeristeisiin verrattuna. Myös muovipohjaisten lämmöneristeiden kosteus- ja äänitekniset ominaisuudet eroavat avohuokoisista villaeristeistä.

Nykyaikaisista puurakenteisista yläpohjista valtaosa toteutetaan siten, että lämmöneristekerroksen alapuolella on höyrynsulkukerros. Vanhoissa rakennuksissa on höyrynsulun sijaan käytetty pelkkää ilmansulkukerrosta (Kaila 1997). Höyryn- ja ilmansulun yhteinen tehtävä on estää ilmavirtaukset sisätilasta yläpohjarakenteen läpi ulos ja toisaalta ulkoa rakenteen läpi sisälle. Ilmavirtaukset rakenteen läpi ovat haitallisia, sillä ne kuljettavat mukanaan kosteutta ja ilman epäpuhtauksia, lisäävät lämmitysenergiankulutusta ja saattavat aiheuttaa vedon tunnetta sisätiloissa sekä vaikeuttavat ilmanvaihtojärjestelmän säätämistä (Vinha 2009). Ilmansulkukerros estää ainoastaan ilman virtauksen rakenteen läpi, kun taas höyrynsulku estää lisäksi sisäilman kosteuden siirtymisen rakenteeseen diffuusiolla (RIL 107-2012). Diffuusiota käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.3. Höyrynsulkuna puurakenteisissa yläpohjissa käytetään useimmiten tätä tarkoitusta varten kehitettyä diffuusiotiivistä muovikalvoa.

Nykyisin saatavilla on myös hygrokalvoiksi kutsuttuja höyrynsulkumateriaaleja, joiden vesihöyrytiiviys riippuu ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta kuvan 2.2 esittämällä tavalla. Hygrokalvon käytön tarkoituksena on tasoittaa sisätilan kosteusvaihteluita ja mahdollistaa lämmöneristekerrokseen mahdollisesti kertyvän kosteuden kuivuminen paitsi ulospäin myös sisätiloihin. (RT 38313 2012) Hygrokalvot ovat muovihöyrynsulkuihin verrattuna keskimäärin jonkin verran enemmän vesihöyryä läpäiseviä. Kolmas tapa toteuttaa rakenteen vaatima höyrynsulku on laminoida jo tehtaalla vesihöyrytiivis pintakerros, kuten alumiinikalvo, lämmöneristelelyn pintaan. Tällaisia vesihöyrytiivisiä eristelevyjä on esimerkiksi osa markkinoilla olevista polyuretaanieristeistä. Diffuusiotiiviin lämmöneristetuotteen kanssa ei siis rakenteessa tarvita erillistä höyrynsulkukerrosta, kunhan eristelevyjen saumat tiivistetään huolellisesti asennuksen yhteydessä. Höyrynsulkukerroksen tiiviys ja yhtenäisyys ovat äärimmäisen tärkeitä rakenteen toimivuuden kannalta riippumatta siitä, millä materiaalilla tiiviys saadaan aikaan. (RIL 107-2012)



**Kuva 2.2.** Esimerkki hygrokalvon diffuusiovastuksen muuttumisesta suhteellisen kosteuden funktiona (Tiivistalo).

Kosteusteknisesti yläpohjarakenteen on siis tarkoitus toimia siten, että vesikate ja mahdollinen aluskate pitävät yhdessä sadeveden rakenteen ulkopuolella ja ilman- ja höyryn-sulkukerros estää sisäilman kosteuden pääsyn rakenteeseen. Kun rakenteeseen kuitenkin aina joutuu kosteutta jollakin tavalla, tarvitaan yläpohjassa vielä oikea määrä rakenteita kuivattavaa tuuletusta, jotta kosteuden kertymisestä ei aiheutuisi ongelmia. Huolehtimalla kaikkien näiden ehtojen täyttymisestä voidaan saavuttaa kosteusteknisesti hyvin toimiva yläpohjarakenne, sillä kuten Lindberg (2003) kirjoittaa: ”jos vettä ei ole, ei yleensä ole vaurioitakaan”.

## 2.2 Yläpohjien kehittyminen ja havaitut ongelmat

Yleisin ongelma pientalojen yläpohjissa 1900-luvulla on ollut jonkinlainen kosteusvaurio. Kosteusvauriolla tarkoitetaan, että rakenteet kastuvat eivätkä pääse kuivumaan tarpeeksi nopeasti. Tällöin kosteus alkaa vioittaa rakenteita ja niihin alkaa samanaikaisesti ilmestyä myös mikrobikasvustoa, jolloin kyseessä on kosteus- ja homevaurio. (Rakennusten kosteus- ja homeongelmat 2012) Kansanterveyslaitos julkaisi vuonna 1995 tutkimuksen (Partanen et al. 1995), jonka mukaan tutkituista 450 suomalaisesta pientalosta 82 %:ssa oli jonkinlainen kosteusvaurio ja suurimman yksittäisen kosteusvaurioiden ryhmän muodostivat yläpohjan vauriot. Kosteusvaurioiden yleisyys ja ongelmien takana olevat syyt vaihtelivat sen mukaan, millä vuosikymmenellä talo oli rakennettu. Eniten vaurioita esiintyi 1960- ja 1970-luvulla rakennetuissa pientaloissa.

Hengitysliitto Heli ry julkaisi vuonna 2006 tutkimuksen pientalojen mikrobivaurioista (Pirinen 2006). Tutkimusaineisto koostui 429 suomalaisesta omakotitalosta, joissa oli tehty kuntotarkastus vuosina 1998–2002 asukkaiden kokeman terveyshaitan takia. Yhteensä 291 rakennuksesta löytyi mikrobivaurioita, ja kaikista tutkimuksessa havaituista mikrobivaurioista 14 % sijaitsi yläpohjissa. Tarkastetuista kohteista 85 %:ssa oli harjakatto, 6 %:ssa tasakatto ja 8 %:ssa aumakatto. Katemateriaalina kohteissa oli peltikate

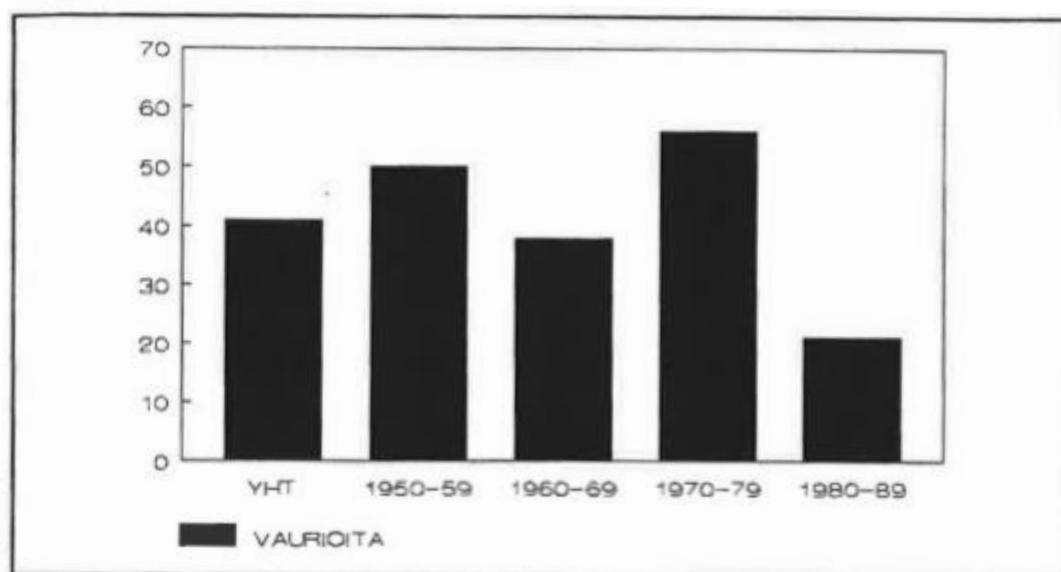
(60 %), bitumikate (20 %) tai tiilikate (15 %). Taulukossa 2.1 on esitetty syyt, jotka olivat aiheuttaneet yläpohjissa havaitut mikrobivauriot. Vauriot on jaoteltu vuotovaurioihin ja muihin kattovaurioihin. Taulukkoon on merkitty, kuinka monessa kohteessa kukin vauriotyyppi havaittiin. Prosenttiluvut esittävät kunkin vauriotyyppin suhteellisen osuuden kaikista havaituista yläpohjavaurioista.

**Taulukko 2.1.** Yläpohjan mikrobivaurioiden aiheuttajat (Pirinen 2006).

| Yläpohjavauriot  | kpl       | %            |
|--|-----------|--------------|
| Piipun tai muun läpiviennin juuri vuoti läpi rakenteiden                       | 16        | 28 %         |
| Harjakaton katteen tai läpiviennin vuoto oli pysähtynyt eristeisiin            | 15        | 26 %         |
| Harjakaton kate vuoti läpi rakenteiden   | 6         | 10 %         |
| Tasakaton kate vuoti läpi rakenteiden  | 3         | 5 %          |
| <b>Vuotovauriot yhteensä</b>   | <b>40</b> | <b>69 %</b>  |
| Huonosti tuulettuva yläpohja   | 12        | 21 %         |
| Korjauksen yhteydessä oli jätetty mikrobivaurioituneet materiaalit vaihtamatta | 3         | 5 %          |
| Yläpohjassa oli liian tiivis tuulensuoja                                       | 2         | 3 %          |
| Vesi kondensoitui peltikattoon ohjeiden mukaisesta tuuletuksesta huolimatta    | 1         | 2 %          |
| <b>Muut kattovauriot</b>   | <b>18</b> | <b>31 %</b>  |
| <b>YLÄPOHJAVAURIOT YHTEENSÄ</b>  | <b>58</b> | <b>100 %</b> |

Taulukosta 2.1 nähdään, että valtaosa yläpohjien vaurioista oli aiheutunut vesikatteen vuodoista (69 %) ja yleisimmin vuodot olivat tapahtuneet läpivientien kohdalta (yhteensä 54 %). Vuotojen ohella yläpohjan huono tuuletus oli merkittävä vauriotyyppi (21 %).

Seuraavassa käsitellään tarkemmin eri vuosikymmenillä yläpohjissa havaittuja vikoja ja ongelmia sekä niiden takana olevia syitä pääosin lähteen Partanen et al. (1995) tutkimukseen perustuen. Tutkimuksessa tarkastellut 450 pientaloa sijaitsivat viidessä eri kaupungissa ja ne oli valittu satunnaisotannalla. Kohteet jakautuivat valmistumisvuotensa perusteella eri vuosikymmenille seuraavasti: 1950-luvulla rakennettuja oli 30 kpl, 1960-luvulla 110 kpl, 1970-luvulla 180 kpl ja 1980-luvulla 130 kpl. Suurin osa kaikista tutkimuksessa havaituista kosteusvaurioista sijaitsi yläpohjassa, ullakolla ja vesikatteessa. Kuvassa 2.3 on esitetty yläpohjien kosteusvaurioiden yleisyys eri vuosikymmenillä valmistuneissa pientaloissa. Kuvaajan y-akselin yksikkö on prosenttia (%).



**Kuva 2.3.** Yläpohjan kosteusvaurioiden yleisyys (%) eri vuosikymmenillä valmistuneissa suomalaisissa pientaloissa (Partanen et al. 1995).

Suomessa oli vielä 1950-luvulla voimissaan perinteinen, vuosikymmenten ja -satojen saatossa vakiintunut rakennustapa. Rakennerratkaisut, rakennusten pohjapiirrokset ja käytetyt materiaalit olivat pysyneet samantapaisina kauan. Lämmöneristeenä 1940- ja 1950-luvun pientalojen yläpohjissa käytettiin 150–200 mm kerrosta sahanpurua, kutteerinlastua tai niiden sekoitusta (Ympäristöministeriö 2014). Vaikka vesikattovuotoja esiintyikin 50 %:ssa tutkituista kohteista, ne eivät aiheuttaneet kovin suurta haittaa rakenteille. Pieniä vesivuotoja esiintyi esimerkiksi peltikatteen naulanreikien kohdalla, mikä saattoi lauhottaa aluslaudoituksen vuotokohdan läheisyydessä. Kohteissa, joissa oli esiintynyt suurempia sadevuotoja, oli sahanpuru kostunut ja se oli jouduttu korvaamaan kuivalla purulla. 1950-luvulla yläpohjien kosteusrasitusta lisäsi se, että ullakkotiloja käytettiin yleisesti pyykkien kuivaamiseen. Kuitenkin yläpohjissa oli usein niin hyvä ilmanvaihto, että ajoittain kostuneet rakenteet pääsivät kuivumaan ajan mittaan. (Partanen et al. 1995)

1960-luvulla valmistuneista taloista 38 %:ssa esiintyi yläpohjan kosteusvaurioita. Peltikatteisissa taloissa vesivuoto tapahtui yleisimmin tiivistämättömien peltisaumojen kautta, kun peltikatteen kiinnitykset löystyivät. Bitumihuopakatoilla yleisimpiä olivat läpivientien juuresta tapahtuneet vuodot. 1960-luvun lopulla suomalainen rakentaminen alkoi muuttua nopeasti. Rakennustarviketeollisuus kehittyi voimakkaasti, otettiin käyttöön uusia rakennusmateriaaleja, -tyylejä ja -tapoja. Perinteinen sahanpurueristys korvattiin mineraalivillalla ja tasakatot yleistyivät. (Partanen et al. 1995) Yläpohjan lämmöneristekerroksen paksuus oli tyypillisesti 150–200 mm, kunnes 1970-luvun lopun energiakriisin seurauksena eristepaksuuksia kasvatettiin noin 200–250 mm:iin (Ympäristöministeriö 2014). Uusista materiaaleista ja rakennerratkaisuista ei kuitenkaan ollut kokemusta, eivätkä kaikki uudet ratkaisut olleet rakennusfysikaalisesti toimivia, mikä

näkyä kuvassa 2.3 kosteusvaurioiden yleistymisenä. 1970-luvulla rakennetuista kohteista 56 %:ssa esiintyi kastuneita yläpohjarakenteita. Ero 1960-luvun kohteiden kosteusvaurioiden määrään selittyy tasakattojen yleistymisellä. Tasakatot olivat herkkiä kosteusvaurioille, koska niissä tuuletustila on matala ja erisuuntaisten kattokannattajien lokeroima, jolloin se tuulettuu huonosti eikä siten siedä pieniäkään vesivuotoja. Lisäksi bitumihuovasta rakennetun vesikatteen läpiviennit eivät olleet tiiviitä ja liian pienet vesikaton kallistukset vaikeuttivat sadevesien johtamista kattokaivoihin, mikä aiheutti veden lammikoitumista katolle. 1970-luvun harjakatoissa ongelmana olivat edelleen kattopeltien tiivistämättömät saumat, joiden kautta pääsi vettä rakenteen sisään. (Partanen et al. 1995)

Mineraalivillaeristeiden käytön yleistyessä huomattiin, että yläpohjarakenteeseen tarvitaan tiivis höyrynsulkukerros. Aikaisemmin rakenteiden tiivistämisessä oli ollut kyse lähinnä rakennuksen ilmatiiviuden parantamisesta, ja ilmansulkumateriaalina oli käytetty esimerkiksi voimapaperia, pinkopaperia ja tapettia (Kaila 1997), joilla ei ollut merkittävää vaikutusta vesihöyryn liikkumiseen rakenteen läpi. Varsinaisia höyrynsulkumateriaaleja, muovitettuja papereita ja höyrynsulkumuoveja, alettiin käyttää yläpohjissa vasta 1950- ja 1960-luvulla (Pentti 2012). Näiden ensimmäisten, polyeteenistä valmistettujen höyrynsulkumuovien kestävyys ja vesihöyrynvastus on sittemmin todettu heikoksi. Vielä 1970- ja 1980-luvulla höyrynsulkuna käytettiin vääränlaisesta muovista valmistettuja ja liian ohuita kalvoja, joiden repeytyminen on voinut usein johtaa kosteus- ja homeongelmiin. Asennustyöstä aiheutui myös naulanreikiä muoveihin ja läpivientikohdat jätettiin usein tiivistämättä. Epätiivis höyrynsulkukerros altisti yläpohjarakenteen sisäilman kosteudelle. (Kaila 1997; Pentti 2012) Myös vesikatteissa 1960- ja 1970-luvulla käytetyt bitumikermi olivat toisinaan heikkolaatuisia tai niiden huoltaminen laiminlyötiin, mikä aiheutti vesivuotoja rakenteisiin (Ympäristöopas 28 1997). Pelti- ja tiilikatteiden yhteydessä puolestaan ei vielä 1970-luvulla käytetty välttämättä lainkaan aluskatetta, jolloin vesikatteen läpi vuotanut sadevesi tai vesikatteen alapintaan tiivistynyt ilmankosteus pääsi valumaan suoraan lämmöneristekerrokseen aiheuttaen kosteusvaurioriskin (Partanen et al. 1995).

1980-luvulle tultaessa yläpohjan lämmöneristekerroksen paksuus oli jo 250–300 mm (Ympäristöministeriö 2014) ja tasakattojen rakentamisesta luovuttiin samaan aikaan lähes kokonaan. Kuten kuva 2.3 osoittaa, myös kosteusvauriot vähenivät samassa yhteydessä huomattavasti. Tutkimuksessa mukana olleista 1980-luvulla rakennetuista pientaloista enää 21 %:ssa oli yläpohjaan vuotanut kosteutta. Kosteusvaurioiden väheneminen selittyy sillä, että aluskatteen käyttö yleistyi, peltikate alettiin kiinnittää ruuveilla ja sen saumat tiivistettiin. Kattopeltien profiileja suurennettiin ja harjapellin lappeita pidennettiin. Yleisimpiä syitä 1980-luvulla tapahtuneisiin vesikatteen vuotoihin olivat tutkimuksen mukaan asennustyön huolimattomuus vesikatteen taitteiden ja läpivientien toteuttamisessa. (Partanen et al. 1995) Vielä 1990-luvulla rakennetuissa pientaloissa yläpohjien yleisimmät vauriot aiheutuivat samoista syistä: vesikatteen vuodoista,

yläpohjan riittämättömästä tuuleutuksesta ja huonosti tiivistetyistä läpivienneistä (Korjaustieto 2014).

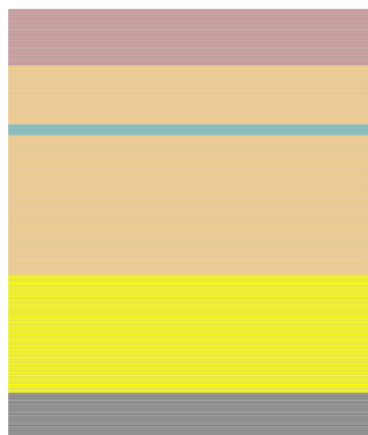
2000-luvun pientalojen yläpohjarakenteissa voi edelleen esiintyä kosteusvaurioita, jotka aiheutuvat vesikatteen vuodoista tai yläpohjan riittämättömästä tuulettumisesta. Nykyisissä yläpohjarakenteissa voi olla mineraalivilla- tai puukuitueristettä jopa yli 500 mm, mistä voi aiheutua uusia ongelmia rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta. Kun rakennukseen asennetaan tehokkaat lämmöneristeet, ei lämpöä enää karkaa rakenteiden ulko-osiin yhtä paljon kuin aiemmin ja lämmöneristeen ulkopuoliset osat viilenevät. Viileään pintaan tiivistyy entistä herkemmin ilman sisältämää kosteutta, jolloin rakenteet kostuvat ja ovat alttiita myös homeen kasvuille. Toisaalta viileämmät rakenteet myös kuivuvat hitaammin, jos rakenteeseen jostain syystä pääsee ylimääräistä kosteutta. Toinen paksujen lämmöneristekerrosten heikkous yläpohjissa yleisesti käytettävien kevyiden puhalluseristeiden yhteydessä on aiemmin luvussa 2.1 mainittu sisäinen konvektio, joka voi lisätä rakenteen läpi siirtyvän lämpöenergian määrää ja siten vähentää eristekerroksen kasvattamisesta saatavaa hyötyä. Lisäksi sisäinen konvektio voi kuljettaa mukanaan kosteutta lämmöneristeen lämpimältä reunalta kylmempiin osiin, missä kosteus lopulta tiivistyy vedeksi tai jääksi ja voi kertyä paikallisesti rakenteeseen haittaa aiheuttaen. Tämän takia nykyisissä yläpohjarakenteissa on entistä tärkeämpää varmistua höyrünsulkukerroksen yhtenäisyydestä ja tiiviyydestä. Myös liiallinen tuuletus voi aiheuttaa ongelmia hyvin eristetyissä yläpohjissa, koska sen mukana tuleva ulkoilman kosteus voi nostaa tuuletuksiltaan suhteellista kosteutta ja tiivistyä yläpohjan rakenteisiin. (Vinha et al. 2013)

## 2.3 FRAME:n yläpohjarakenteita koskevat tulokset

Vuosina 2009–2012 tehtiin TTY:llä FRAME (Future envelope assemblies and HVAC solutions) -tutkimus, jossa tavoitteena oli selvittää, miten ilmastonmuutos ja lämmöneristyksen lisääminen vaikuttavat vaipparakenteiden kosteustekniseen toimintaan Suomen ilmastossa. Tutkimuksessa pyrittiin myös löytämään rakenteiden kosteusteknistä toimintaa parantavia ratkaisuja. FRAME-projektin keskeinen tulos oli, että sekä vaipparakenteiden kosteustekninen toiminta että vikasietoisuus heikkenivät ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäämisen seurauksena, koska lämpötila- ja kosteusolosuhteet muuttuvat rakenteiden sisällä. Tässä kappaleessa käsitellään FRAME:n yhteydessä tehtyjä puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien tarkasteluja ja niistä saatuja tuloksia rakenteiden homehtumisriskin ja sisäisen konvektion osalta lähteeseen Vinha et al. (2013) perustuen.

FRAME:ssa tarkasteltiin harjakattoista tuulettuvaa yläpohjaa, jossa lämmöneristeen ja aluskatteen väliin jäävä ilmatila on kolmionmuotoinen. Kuvassa 2.4 on esitetty tyypillinen tutkimuksessa käytetty harjakattoisen yläpohjan laskentamalli, jonka materiaalikerrokset ylhäältä lukien ovat: tiilikate, tuuletusväli 20 mm, aluskate, ilmatila, lämmöneris-

te, höyrynsulku ja kipsilevy. Rakennetta on yksinkertaistettu jättämällä mallintamatta kaikki puurakenteet, kuten kattoristikot, vesikatteen alusrakenteet ja sisäkaton koolaukset. Lämmöneristemateriaalina tarkasteluissa käytettiin puhallettavaa puukuitueristettä ja puhallettavaa mineraalivillaa.



**Kuva 2.4.** Tyypillinen harjakattoisen yläpohjan laskentamalli FRAME-tutkimuksessa (Vinha et al. 2013). Kuva ei ole mittakaavassa.

Yläpohjarakenteessa tutkittiin suoran auringonsäteilyn, yläpohjan lämmöneristemateriaalin ja -määrän, rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen, aluskatteen vesihöyryn- ja lämmönvastuksen, kalvomaisen aluskatteen emissiviteetin ja yläpohjan ilmanvaihtuvuuden vaikutusta rakenteen toimintaan nykyilmastossa sekä vuosien 2050 ja 2100 ilmastoissa. Tarkastelupiste sijaitsi yläpohjan tuuletustilan yläosassa.

Laskennalliset tarkastelut tehtiin rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmällä, joka on esitelty tämän työn luvussa 6.1. Laskenta suoritettiin yhdistetyllä lämmön- ja kosteudensiirron laskentaohjelmalla Delphin 5.7.3 ja laskennasta saatujen tulosten oikeellisuutta varmistettiin kenttämittauksista saatujen tulosten avulla. Laskentaohjelmassa käytettiin ensisijaisesti suomalaisten rakennusmateriaalien materiaaliominaisuuksia ja kaikki laskelmat tehtiin käyttäen ulkoilman olosuhteina Jokioisen testi-vuosien ilmastodataa. Laskentatarkasteluissa ei huomioitu mahdollisia rakenteessa todellisuudessa esiintyviä ilma- ja kosteusvuotoja vaan rakenteiden oletettiin toimivan ideaalisesti.

FRAME:n tulosten mukaan U-arvojen kiristyminen, ilmastonmuutos ja rakenteeseen kohdistuvan suoran auringonsäteilyn puuttuminen lisäävät homeen kasvun riskiä yläpohjan ilmatilan yläosassa. Siten nämä tekijät heikentävät yläpohjarakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Yläpohjarakenteiden toiminnan kannalta tuuletustilan ilmanvaihtuvuuden merkitys oli suuri. Optimaaliseksi ilmanvaihtuvuudeksi ideaaliselle yläpohjalle osoittautui noin 0,5-1 1/h ja rakenteen toiminta heikkeni ilmanvaihtuvuuden ollessa tätä pienempi tai suurempi. Laskentatulokset osoittivat, että kohtalaisen pieni ilmanvaihtuvuus yhdistettynä riittävän suureen aluskatteen vesihöyrynvastukseen pääasiassa paran-

taa yläpohjan olosuhteita. Suurempi ilmanvaihtuvuus arvioitiin kuitenkin tarpeelliseksi silloin, jos yläpohjaan kohdistuu ylimääräistä kosteuskuormitusta ilma- tai sadevuotojen seurauksena.

Yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa voidaan tutkimuksen tulosten perusteella parantaa huolehtimalla rakenteen ilmatiiviydestä ja sisäpinnan riittävästä vesihöyrynvastuksesta sekä lisäämällä tarvittaessa rakenteen ulko-osan lämmönvastusta. Rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastusta kasvattamalla voitiin pienentää yläpohjan tuuletustilan yläosan homeindeksiä sitä enemmän, mitä vähäisempi oli tuuletustilan ilmanvaihtuvuus. Kantavien puurakenteiden yläpuolelle aluskatteen yhteyteen lisätyllä lämmöneristyksellä voitiin pienentää yläpohjan homeindeksin maksimiarvoa kaikilla ilmanvaihtuvuuksilla, kuitenkin siten, että lämpöä eristävän aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen yli  $1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$  paransi yläpohjan olosuhteita enää vähän. Puukuitueristeellä toteutetun yläpohjarakenteen vaatima aluskatteen lämmönvastus, jolla varjossa olevan yläpohjan yläosan homeindeksin maksimiarvo Jokioisen ilmastossa oli alle 1, oli noin  $0,40 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

FRAME:ssa todettiin tuulettuvan yläpohjan lämmöneristeen suuren kosteuskapasiteetin olevan edullinen yläpohjan homehtumisriskin pienentämisen kannalta silloin, kun tuuletustilan ilmanvaihtuvuus oli riittävän pieni ( $< 1\text{--}5 \text{ l/h}$ ). Syyksi tähän arveltiin suuren kosteuskapasiteetin omaavan lämmöneristekerroksen kykyä tasata yläpohjan olosuhteiden vuorokautista vaihtelua. FRAME-tutkimuksessa yläpohjan homehtumisriskiä on tarkasteltu vain tuuletustilan yläosassa. Tutkimusraportissa on kuitenkin todettu, että yläpohjarakenteiden olosuhteita voi olla tarpeen tarkastella sekä lämmöneristekerroksessa että yläpohjan ilmatilassa, koska todellisissa rakenteissa lämmöneristekerroksen sisällä on puisia kattoristikoiden sauvoja, jotka homehtuvat herkemmin kuin itse lämmöneristemateriaali. Näitä puuosia ei ole huomioitu FRAME:n laskelmissa.

Homehtumisriskin lisäksi FRAME-projektissa tutkittiin kokeellisesti sisäisen konvektion vaikutusta yläpohjien lämpötekniiseen toimintaan. Tavoitteena oli selvittää, kuinka merkittävä heikentävä vaikutus sisäisellä konvektiolla voi olla yläpohjarakenteiden U-arvoihin ja kuinka hyvin sisäisen konvektion esiintymistä hallitaan rajoittamalla yläpohjarakenteiden muunnettuja Rayleghin lukuja. Sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen U-arvoon tutkittiin vertaamalla kokeellisesti määritettyjä U-arvoja laskennallisesti määritettyihin arvoihin, jotka huomioivat vain lämmön johtumisen. Laskennallisesti ja kokeellisesti määritettyjen U-arvojen välisen eron oletettiin johtuvan enimmäkseen sisäisestä konvektiosta. U-arvojen kokeellinen määrittäminen suoritettiin TTY:n rakennushallissa sijaitsevalla tutkimuslaitteistolla. Tutkimuksessa käytetyt koerakenteet vastasivat eristepaksuuden ja eristeen ilmanläpäisevyyden osalta tavanomaisia puhalluseristeillä toteutettuja yläpohjarakenteita. Koerakenteissa käytettiin lämmöneristeenä puhallettavaa lasivillaa, puhallettavaa puukuitueristettä ja levymäistä lasivillaa.



Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 (2012) on ilmoitettu muunnetun Rayleighin luvun raja-arvot, joiden alapuolella merkittävää sisäistä konvektiota ei esiinny. Yläpinnastaan avoimelle lämmöneristekerrokselle raja-arvo on 15 ja tuulensuojan sisältävälle lämmöneristekerrokselle 30. Kaikki FRAME-tutkimuksessa tarkastellut yläpohjarakenteet alittivat nämä raja-arvot, mutta kokeiden perusteella niissä esiintyi siitä huolimatta merkittävää sisäistä konvektiota. Tulosten perusteella yläpohjan 600 mm paksussa avohuokoisessa lämmöneristekerroksessa sisäinen konvektio voi lisätä lämpövirtaa rakenteen läpi jopa 30–50 %. Muunnetun Rayleighin luvun raja-arvon tulisi tutkimuksen mukaan olla tuulensuojatuilla ja suojaamattomilla yläpohjarakenteilla enintään 5, jotta sisäinen konvektio ei vaikuttaisi haitallisesti rakenteen lämpötekniiseen toimivuuteen.

FRAME:n mukaan nykyisten puhalluseristeiden ilmanläpäisevyyksillä merkittävää sisäistä konvektiota alkaa esiintyä, kun eristepaksuus ylittää 250–300 mm. Nykyiset yläpohjarakenteiden eristepaksuudet ovat tätä suurempia, joten niissä esiintyy sisäistä konvektiota. Sisäistä konvektiota voidaan hillitä parhaiten pienentämällä lämmöneristeen ilmanläpäisevyyttä joko kasvattamalla eristeen tiheyttä tai lisäämällä eristeen joukkoon sideainetta. Toinen tapa on korvata yläpohjien puhalluseriste osittain tai kokonaan levymaisella lämmöneristeellä, jonka ilmanläpäisevyys on pienempi kuin puhallusvillalla. Tuulensuojan asettaminen paksun ja ilmaa läpäisevän eristekerroksen yläpuolelle ei sen sijaan vaikuta sisäisen konvektion suuruuteen merkittävästi. Sisäisen konvektion heikentävää vaikutusta yläpohjan lämmöneristävyyteen ei myöskään kannata kompensoida lämmöneristettä lisäämällä, koska se voimistaa sisäistä konvektiota entisestään.

FRAME-tutkimuksen raportissa mainitaan yläpohjarakenteissa esiintyvän sisäisen konvektion tutkimisen olevan haastavaa ilmiön monimutkaisuuden takia. Tutkimuksen mitataavasta johtuen tulosten on arvioitu olevan lähinnä suuntaa antavia ja tulosten tarkkuuden parantaminen vaatisi laajempia, todellisuutta paremmin vastaavia koejärjestelyitä.

## 3 TEORIA

Luvut 3.1 ja 3.2 sisältävät myöhempien laskentatarkastelujen pohjana olevan lämmön- ja kosteudensiirron teorian kaavoineen. Pohjatiedoksi työn loppuosan seuraamista helpottamaan kuvataan luvuissa 3.3 ja 3.4 yläpohjarakenteissa esiintyviä ilma- ja kosteusvuotoja sekä Suomen ilmastoa ja sen ennustettua muuttumista tulevaisuudessa.

### 3.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö on molekyylien liike-energiaa. Lämmön siirtymisen voidaan määritellä olevan aineen lämpötilaeroista aiheutuvaa energian siirtymistä paikasta toiseen. Erilaisia lämmön siirtymistapoja on olemassa kolme: johtuminen, konvektio ja säteily. (Hagentoft 2001) Näitä siirtymismuotoja käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

#### 3.1.1 Johtuminen

Lämmön johtumisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa molekyylien liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen. Johtumisessa molekyylien paikat eivät vaihdu, vaan lämmön virtaus tapahtuu molekyylien sisäisen värähtelyn seurauksena. Lämpö pyrkii tasaantumaan väliaineessa, eli lämpövirran suunta on aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpöä siirtyy johtumalla kiinteissä aineissa, nesteissä ja kaasuissa. (Vinha 2011; Siikanen 2014)

Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) homogeenisessa ja isotrooppisessa materiaalissa voidaan esittää Fourierin lain avulla (Hagentoft 2001):

$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3.1)$$

missä

|           |    |  |
|-----------|----|--|
| $\lambda$ | on | materiaalin lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{mK})$ ) |
| $T$       | on | lämpötila (K)  |

Yksiulotteisessa tapauksessa rakenteen lämpötilajakauman ollessa lineaarinen muuttuu kaava (3.1) yksinkertaisempaan muotoon (Vinha 2011)

$$q = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{d} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (3.2)$$

missä

$T_{1,2}$  on lämpötilat materiaalikerroksen eri puolilla (°C, K)  
 $d$  on materiaalikerroksen paksuus (m)

Lämpövirta  $\Phi$  (W) materiaalin läpi saadaan kertomalla lämpövirran tiheys rakenteen pinta-alalla  $A$  (m<sup>2</sup>)

$$\Phi = qA \quad (3.3)$$

Kaavoissa (3.1) ja (3.2) esiintyvä lämmönjohtavuus  $\lambda$  on kullekin materiaalille ominainen suure, jonka arvo riippuu muun muassa materiaalin tiheydestä, huokoisuudesta ja kosteuspitoisuudesta. Tietyn lämmönjohtavuuden ja paksuuden omaavan materiaalikerroksen lämmönvastus  $R$  (m<sup>2</sup>K/W) ja lämmönläpäisykerroin  $U$  (W/(m<sup>2</sup>K)) voidaan laskea kaavoilla (Vinha 2011)

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (3.4)$$

$$U = \frac{1}{R} \quad (3.5)$$

Useita materiaaleja sisältävän kerroksellisen rakenteen kokonaislämmönvastus  $R_T$  (m<sup>2</sup>K/W) saadaan laskemalla yhteen kaikkien kerrosten lämmönvastukset sekä rakenteen sisä- ja ulkopintojen pintavastukset  $R_{si}$  ja  $R_{se}$ .

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (3.6)$$

Pintavastus kuvaa rakennusosan pinnan ja ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastusta. Tyypillisiä pintavastusten arvoja on esitetty Suomen rakentamismääräyskoelman osassa C4. (RakMk C4 2012) Pintavastusten arvot riippuvat pinnan suunnasta, pintaan tulevasta ja pinnasta poistuvasta lämpösäteilystä sekä ilmavirtauksista pinnan lähellä. Tavallisesti rakenteen sisäpinnan pintavastukselle voidaan käyttää karkeita arvoja lämmön siirtymissuunnan mukaan: lämmön siirtyessä vaakasuuntaan  $R_{si}$  on 0,13, ylöspäin 0,10 ja alaspäin 0,17. Ulkopinnan pintavastukselle  $R_{se}$  voidaan käyttää siirtymissuunnasta riippumatta arvoa 0,04. (Vinha 2011)

Yhdistämällä kaavat (3.2), (3.4) ja (3.6) muodostuu kaava, jonka avulla voidaan laskea stationääritilanteessa rakenteessa vallitseva lämpötila  $T_x$  etäisyydellä  $x$  rakenteen pinnasta. (Vinha 2011)

$$T_x = T_i - \frac{\sum_{n=i}^x R_n}{R_T} (T_i - T_e) \quad (3.7)$$

missä

$\sum_{n=i}^x R_n$  on lämmönvastusten summa sisäilmasta kohtaan  $x$  (m<sup>2</sup>K/W)  
 $T_i$  on sisäilman lämpötila (°C, K)

$T_e$  on ulkoilman lämpötila (°C, K)

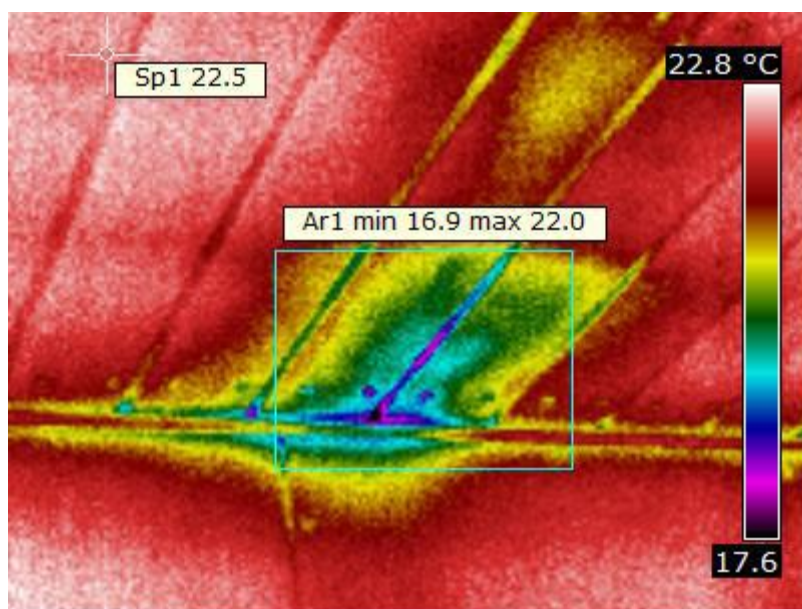
Epästationäärisessä tapauksessa rakenteessa eri ajanhetkillä vallitsevien lämpötilojen ja lämpövirran tiheyden määrittämiseen tarvitaan johtumisen energiataseyhtälöä. Energiataseyhtälö esittää rakenteeseen varastoituneen energian tarkastelupisteeseen tulevan ja siitä lähtevän lämpövirran erotuksena, johon lisätään mahdollinen tarkastelupisteessä tapahtuva lämmönkehitys tai lämpöhäviö. Johtumisen energiataseyhtälö on muotoa (Vinha 2011)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' \quad (3.8)$$

missä

|        |    |  |
|--------|----|--|
| $\rho$ | on | materiaalin tiheys (kg/m <sup>3</sup> )          |
| $c$    | on | materiaalin ominaislämpökapasiteetti (J/(kg·K))  |
| $t$    | on | aika (s)   |
| $q'$   | on | lämmönkehitys tai lämpöhäviö (W/m <sup>3</sup> ) |

Homogeenisista materiaalikerroksista koostuvissa rakenteissa lämpövirran tiheys on yhtä suuri kaikkien kerrosten läpi (Vinha 2011). Useista eri materiaaleista koostuvissa todellisissa rakenteissa esiintyy kuitenkin lähes poikkeuksetta kylmäsiltoja, joiden kohdalla lämpövirrat ovat suurempia kuin muualla rakenteessa. Kylmäsiltojen kohdasta on esimerkki kuvassa 3.1.



**Kuva 3.1.** Lämpökamerakuva yläpohjan kylmäsiltoista ja ilmavuotokohdasta ulkoseinän ja yläpohjan liitoksessa (Entec Oy).

Kylmäsiltoja voivat muodostaa esimerkiksi lämmöneristekerroksen läpäisevät metalli- tai puuosat, joiden lämmönjohtavuus on merkittävästi suurempi kuin lämmöneristema-

teriallin. Kylmäsillat ovat haitallisia, sillä ne lisäävät rakennusvaipan lämpöhäviöitä ja aiheuttavat pistemäisiä viileitä kohtia rakenteen sisäpintaan, mikä puolestaan voi aiheuttaa sisäpinnan epätasaista likaantumista ja kosteusongelmia sisäilman kosteuden tiivisyydessä näihin kohtiin (Björkholtz 1997; Hagentoft 2001).

### 3.1.2 Konvektio

Konvektio tarkoittaa paine-eron aikaansaamaa kaasun tai nesteen virtausta, joka kuljettaa mukanaan lämpöenergiaa. Virtaus voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetun virtauksen aiheuttaa ulkoinen voima, kuten tuuli, puhallin tai pumppu. Luonnollinen konvektio taas syntyy lämpötilaeroista johtuvasta virtaavan aineen tiheyserosta (Hagentoft 2001). Lämmitessään ilma kevenee ja nousee ylöspäin, jolloin viileä, raskaampi ilma vastaavasti painuu alaspäin ja syntyy jatkuva virtaus. Lämmönsiirron yhteydessä konvektio määritellään virtaavassa aineessa tapahtuvan molekyyliden diffuusion ja makroskooppisen aineensiirron eli advektion summana. Virtausnopeuden ollessa alhainen tapahtuu lämmönsiirto pääasiassa molekyyliden diffuusion vaikutuksesta. Konvektion yhteydessä voi olosuhteista riippuen tapahtua myös aineen faasimuutosten, kuten esimerkiksi vesihöyryn tiivistymisen ja veden jäätymisen, aiheuttamaa lämmön siirtymistä. (Vinha 2011)

Rakennusfysiikassa tarkastellaan tavallisesti ilman konvektiovirtausta. Konvektio voi tapahtua koko rakenteen läpi, joidenkin rakennekerrosten läpi tai sisäisenä konvektiona rakenteessa olevan yksittäisen materiaali- tai ilmakerroksen sisällä. Sisäisen konvektion vaikutus rakenteen lämmöneristävyyteen voi olla merkittävä erityisesti seinä- ja yläpohjarakenteilla, joissa rakenteen sisä- ja ulkopinnan välinen suuri lämpötilaero voi aiheuttaa rakennekerroksen pintoja pitkin kiertävän luonnollisen konvektiovirtauksen. (Vinha 2011)

Konvektiivinen lämpövirran tiheys  $q_{conv}$  (W/m<sup>2</sup>) esitetään Newtonin lain avulla

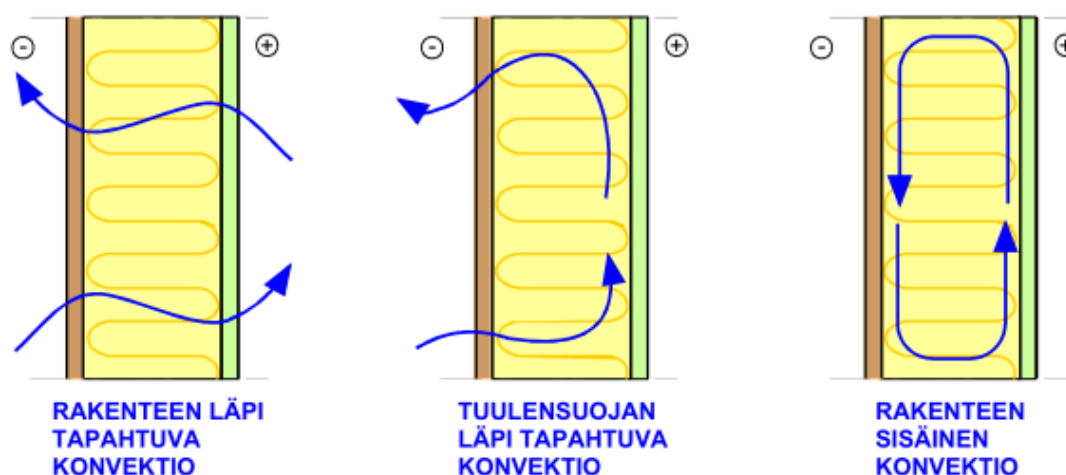
$$q_{conv} = h_{conv}(T_s - T_a) \quad (3.9)$$

missä

|            |    |  |
|------------|----|--|
| $h_{conv}$ | on | konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(m <sup>2</sup> ·K)) |
| $T_s$      | on | materiaalin pintalämpötila (K)                             |
| $T_a$      | on | ympäristön ilman lämpötila (K)                             |

Konvektiivisen lämmönsiirtokerroimen arvo määräytyy sen mukaan, onko kyseessä pakotettu, tuulen aiheuttama vai lämpötilaeroista aiheutuva luonnollinen konvektio. Muut kertoimen arvoon vaikuttavat tekijät ovat virtauksen suunta pinnan suhteen, virtauksen laminaarisuus tai turbulentsuus sekä virtaavan aineen termiset ominaisuudet ja virtausominaisuudet. Luonnollisen konvektion lämmönsiirtokerroimen arvo on kaasuille 2–25 W/(m<sup>2</sup>·K) ja pakotetun konvektion 25–250 W/(m<sup>2</sup>·K). (Vinha 2011)

Konvektiivista lämmön siirtymistä voi tapahtua paitsi rakenteen pinnasta ympäröivään ilmaan, myös rakenteessa olevassa avoimessa tai suljetussa ilmvälissä, rakenteessa olevan raon tai reiän läpi, huokoisen materiaalin läpi tai huokoisen materiaalin sisällä. (Vinha 2011) Erilaisia konvektiomuotoja on havainnollistettu kuvassa 3.2. Kun ilmväli on hyvin tuulettuva, voidaan konvektion heikentävä vaikutus rakenteen lämmöneristävyyteen huomioida jättämällä ilmvälin ulkopuolella olevat rakennekerrokset huomioimatta laskennassa ja käyttämällä tuuletusvälin sisäpuolisen rakenneosan pintavastuksena poikkeuksellisesti rakenteen sisäpinnan pintavastuksen arvoa. Heikosti tuulettuvan ilmvälin lämmönvastukseksi voidaan olettaa puolet vastaavan tuulettumattoman ilmvälin lämmönvastuksesta. (RakMk C4 2012)



**Kuva 3.2.** Erilaisia rakenteessa tapahtuvia konvektiovirtauksia (Vinha 2011).

Konvektio suljetussa ilmvälissä on merkittävä ilmiö pystyrakenteissa, joissa lämpövirran suunta on vaakasuora (ulkoseinäarakenteet) ja vaakarakenteissa, joissa lämpövirran suunta on alhaalta ylöspäin (yläpohjarakenteet). Näissä tapauksissa rakenteisiin syntyy edellä kuvatun kaltainen luonnollinen konvektiovirtaus, joka lisää rakenteen läpi siirtyvää lämpövirtaa sitä enemmän mitä suurempi on ilmvälin pintojen välinen lämpötilaero. Alapohjarakenteissa sen sijaan lämmin ja kevyt ilma on rakenteen yläosassa, lämpövirran suunta on ylhäältä alaspäin, eikä luonnollista konvektiota näin ollen synny.

Rakenteessa olevan raon tai reiän läpi konvektiolla siirtyvän lämpövirran tiheyden nettoarvo, kun korvausilma otetaan rakennuksen ulkopuolelta, lasketaan kaavalla

$$q_{conv} = \rho_a c_{pa} r_a (T_1 - T_2) = c_{pa} \dot{m}_a (T_1 - T_2) \quad (3.10)$$

missä

|          |    |   |
|----------|----|---|
| $\rho_a$ | on | ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ )                                |
| $c_{pa}$ | on | ilman ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ ) |
| $r_a$    | on | ilmavirran tiheys ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )    |

$\dot{m}_a$  on ilman massavirran tiheys (kg/(m<sup>2</sup>·s))  
 $T_1, T_2$  on lämpötilat raon päissä (°C, K)

Sisäinen konvektio on ilmiönä samanlainen kuin konvektio suljetussa ilmapölyssä. Sillä tarkoitetaan lämpötilaeroista aiheutuvaa, eristekerroksen sisällä kiertävää ilmavirtausta, joka lisää kerroksen läpi siirtyvää lämpövirtaa. (Vinha 2011) Sisäistä konvektiota esiintyy tyypillisesti ulkoseinä- ja yläpohjarakenteiden avohuokoisissa, ilmaa läpäisevissä lämmöneristeissä, kuten mineraalivillassa ja puukuitueristeessä.

Pelkän lämpötilaeron aiheuttaman sisäisen konvektion suuruutta voidaan arvioida laskemalla lämmöneristekerrokselle muunnettu Rayleighin luku  $Ra_m$  (-). Muunnettu Rayleighin luku kuvaa luonnollisen konvektion potentiaalia ja sen suuruus riippuu oheisen kaavan mukaisesti lämmöneristeen ilmanläpäisevyydestä ja paksuudesta sekä eristekerroksen yli vallitsevasta lämpötilaerosta (SFS-EN ISO 10456 2008; Vinha 2011).

$$Ra_m = \frac{\rho_a \cdot c_{pa} \cdot g \cdot \beta \cdot d \cdot k_{ins} \cdot (T^+ - T^-)}{\gamma_a \lambda_{ins}} \quad (3.11)$$

missä

$g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys (9,81 m/s<sup>2</sup>)  
 $\beta$  on ilman tilavuuden lämpölaajenemiskerroin (1/K)  
 $d$  on lämmöneristekerroksen paksuus (m)  
 $k_{ins}$  on lämmöneristeen permeabiliteetti (m<sup>2</sup>)  
 $T^+, T^-$  on lämpötilat lämmöneristekerroksen pinnoilla (°C, K)  
 $\gamma_a$  on ilman kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)  
 $\lambda_{ins}$  on lämmöneristeen lämmönjohtavuus (W/(mK))

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa kaavassa (3.11) esiintyvät ilman ominaisuudet voidaan korvata standardissa ISO 10292 annetuilla 10 °C lämpötilassa määritetyillä arvoilla, jolloin kaava yksinkertaistuu muotoon (SFS-EN ISO 10456 2008; RakMk C4 2012)

$$Ra_m = 3 \times 10^6 \frac{d \cdot k_{a,ins} \cdot \Delta T}{\lambda_{ins}} \quad (3.12)$$

missä

$\Delta T$  on lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnan välinen lämpötilaero (50 °C)

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 on annettu yläpohjien ja ulkoseinien lämmöneristekerrosten muunnetulle Rayleighin luvulle raja-arvot, joiden ylittyessä sisäisestä konvektiosta on haittaa rakenteen toiminnalle. Jos laskemalla saatu muunnettu Rayleighin luku ylittää raja-arvon, tulee konvektio estää rakenteellisin toimenpitein tai vaihtamalla lämmöneriste vähemmän ilmaa läpäisevään materiaaliin. (RakMk C4 2012)

### 3.1.3 Säteily

Lämmön säteilyllä tarkoitetaan ilmiötä, jossa lämpöenergiaa siirtyy sähkömagneettisena aaltoliikkeenä kahden keskenään eri lämpötilassa olevan pinnan välillä. Säteily etenee valonnopeudella eikä se muista lämmönsiirtomuodoista poiketen vaadi lainkaan väliainetta edetäkseen. Kaikki lämpötilaltaan absoluuttisen nollapisteen ( $-273,15\text{ °C}$ ) yläpuolella olevat kappaleet säteilevät lämpöenergiaa ympäristöönsä. Säteilyä syntyy aineen elektronien vaihtaessa paikkaa atomeissa ja molekyyileissä. (Vinha 2011)

Lämpösäteilyn aallonpituusalue kattaa infrapunasäteilyn ja näkyvän valon aallonpituudet sekä osan ultraviolettisäteilyn aallonpituusalueesta. Rakennusfysiikassa lämpösäteily jaetaan säteilyn aallonpituusjakauman perusteella lyhytaaltoiseen ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lyhytaaltainen säteily on tyypillisesti auringonsäteilyä, joka käsittää suoraan auringosta tulevan säteilyn lisäksi ilmakehän hiukkasista ja pilvistä heijastuneen diffuusin säteilyn. Myös maanpinnasta ja rakennuksista heijastuva auringonsäteily on lyhytaaltoista säteilyä. Sen sijaan rakennusten ja muiden alemmassa lämpötilassa olevien pintojen lähettämä säteily on pitkäaaltoista lämpösäteilyä. (Vinha 2011)

Pinnan lähettämällä säteilyteholla on yläraja, jota kutsutaan mustan kappaleen säteilytehoksi  $E_b$  ( $\text{W/m}^2$ ) (Vinha 2011)

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3.13)$$

missä

|          |    |  |
|----------|----|--|
| $\sigma$ | on | Stefan-Boltzmannin säteilyvakio ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ) |
| $T_s$    | on | säteilyä lähettävän pinnan lämpötila (K)   |

Todellisuudessa ainoastaan auringon lähettämä säteilyteho vastaa ideaalisen mustan kappaleen säteilytehoa. Muiden kappaleiden todellinen säteilyteho  $E$  ( $\text{W/m}^2$ ) suhteessa mustan kappaleen säteilytehoon ilmoitetaan pinnan emissiviteetin  $\varepsilon$  (-) avulla. (Vinha 2011)

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (3.14)$$

Emissiviteetin arvo vaihtelee pinnasta ja materiaalista riippuen välillä 1-0 ja sitä voidaan pitää materiaalikohtaisena vakiona rakennuksissa esiintyvällä lämpötila-alueella. Yhdistämällä kaavat (3.13) ja (3.14) voidaan laskea todellisen pinnan lähettämä säteilyteho (Vinha 2011)

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3.15)$$

Kohdatessaan pinnan osa säteilystä heijastuu, osa absorboituu pintaan ja osa kulkee materiaalin läpi. Pintaan tulevan kokonaissäteilyn jakaantumista eri säteilykomponentteihin



kuvataan kolmella kertoimella, jotka ovat heijastuskertoimen  $\rho$ , absorptiokerroin  $\alpha$  ja läpäisykerroin  $\tau$ . Kertoimet toteuttavat yhtälön (Vinha 2011)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.16)$$

Suurin osa rakennusmateriaaleista, lukuun ottamatta lasia ja joitakin muita läpinäkyviä materiaaleja, ei läpäise lämpösäteilyä merkittävästi. Tämän seurauksena läpäisykerroin  $\tau$  voidaan usein jättää edellä olevasta kaavasta pois, jolloin pinnan heijastuskertoimen saadaan absorptiokertoimen avulla kaavasta (Vinha 2011)

$$\rho = 1 - \alpha \quad (3.17)$$

Rakennusfysiikassa tarkasteltavia pintoja kutsutaan harmaiksi pinnoiksi, joiden emittoiman säteilyn oletetaan jakautuvan tasaisena diffuusina säteilyä kaikkiin suuntiin. Harmaiden kappaleiden välistä pitkäaaltoista säteilyä tarkasteltaessa on voimassa Kirchhoffin laki, jonka mukaan pinnan absorptiokerroin on yhtä suuri kuin pinnan emissiviteetti (Vinha 2011)

$$\alpha = \varepsilon \quad (3.18)$$

Lyhytaaltoiselle auringonsäteilylle käytettävä pinnan absorptiokerroin  $\alpha_{sol}$  voi erota huomattavasti pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimesta ja emissiviteetistä. Auringon säteilyn absorptiokertoimen arvo vaihtelee välillä 1-0. Mitä vaaleampi pinta on kyseessä, sitä pienempi on sen absorptiokerroin. (Vinha 2011)

Auringon lähettämästä säteilytehosta ainoastaan pieni osa päätyy maan pinnalle. Ilmakehän ulko-osiin tuleva auringon säteilyteho  $I_{sol,0}$  on keskimäärin  $1340 \text{ W/m}^2$ . Osa säteilystä heijastuu ja siroaa ilmakehästä takaisin avaruuteen ja osa absorboituu ilmakehään. Ilmakehän läpäisevä auringon säteilyteho  $I_{sol}$  ( $\text{W/m}^2$ ) saadaan kaavasta (Vinha 2011)

$$I_{sol} = I_{sol,0} \tau^m \quad (3.19)$$

missä

|        |    |  |
|--------|----|--|
| $\tau$ | on | ilmakehän läpäisykerroin (-), 0,62...0,81 pilvisyydestä riippuen |
| $m$    | on | suhteellinen läpäisymassa (-)                                    |

Ilmakehän läpäisseen auringon säteilytehon perusteella voidaan laskea säteilyteho  $I_{sol,N}$  kohtisuoraan tarkasteltavaa pintaa vasten säteilyn lankeamiskulman  $\nu$  avulla (kaava 3.20). Kun tähän säteilytehoon lisätään pintaan tuleva diffuusi säteily  $I_D$  ja taivaalta tuleva pitkäaaltoinen lämpösäteily  $I_{sky}$ , saadaan ilmakehän kautta pintaan tuleva säteilyteho  $I_{atm}$  (kaava 3.21). Kun ilmakehästä tulevaan säteilyyn lisätään maasta ja muista kappaleista emittoituva pitkäaaltoinen lämpösäteily  $I_{sur}$ , saadaan laskettua pintaan tuleva kokonaissäteily  $I_{tot}$  (kaava 3.22). (Vinha 2011)

$$I_{sol,N} = I_{sol} \cdot \cos \nu \quad (3.20)$$

$$I_{atm} = I_{sol,N} + I_D + I_{sky} \quad (3.21)$$

$$I_{tot} = I_{atm} + I_{sur} \quad (3.22)$$

Taivaalta tuleva pitkäaaltoinen säteily riippuu pilvisyydestä ja taivaan tehollisesta lämpötilasta  $T_{sky}$ . Kirkkaina, pilvettöminä öinä taivaan tehollinen lämpötila voi laskea ulkoilman lämpötilan alapuolelle, jolloin nettosäteilyn suunta on rakenteen ulkopinnasta taivaalle. Tämän seurauksena rakenteen ulkopinnan lämpötila laskee alhaisemmaksi kuin ympäröivän ilman lämpötila. (Vinha 2011)

Pintojen välisen nettosäteilyn lämpövirran tiheys  $q_{rad}$  (W/m<sup>2</sup>) lasketaan kaavalla (Vinha 2011)

$$q_{rad} = h_{rad}(T_s - T_{sur}) \quad (3.23)$$

missä

|           |    |  |
|-----------|----|--|
| $h_{rad}$ | on | tarkasteltavan pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/(m <sup>2</sup> ·K)) |
| $T_s$     | on | pinnan lämpötila (°C, K)   |
| $T_{sur}$ | on | ympäröivien pintojen lämpötila (°C, K)                                     |

Rakennuksen ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin  $h_{rad,e}$  (W/(m<sup>2</sup>·K)) voidaan laskea riittävän tarkasti kaavalla (Vinha 2011)

$$h_{rad,e} \approx 4\varepsilon_{12}\sigma \left( \frac{T_{se} + T_{sky}}{2} \right)^3 \quad (3.24)$$

missä

|                    |    |   |
|--------------------|----|---|
| $\varepsilon_{12}$ | on | ulkopinnan ja taivaan välinen yhdistetty emissiviteetti (-) |
| $T_{se}$           | on | rakenteen ulkopinnan lämpötila (°C, K)                      |

Rakennusfysikaalisissa laskentatarkasteluissa rakennuksen ulkopinnan ja taivaan yhdistettynä emissiviteettinä voidaan yleensä käyttää ulkopinnan emissiviteettiä. Säteilyn lämmönsiirtokertoimen arvo on rakenteen ulkopinnassa tyypillisesti 3...6 W/(m<sup>2</sup>K) ja sisäpinnassa 4,5...5,5 W/(m<sup>2</sup>K). (Vinha 2011)

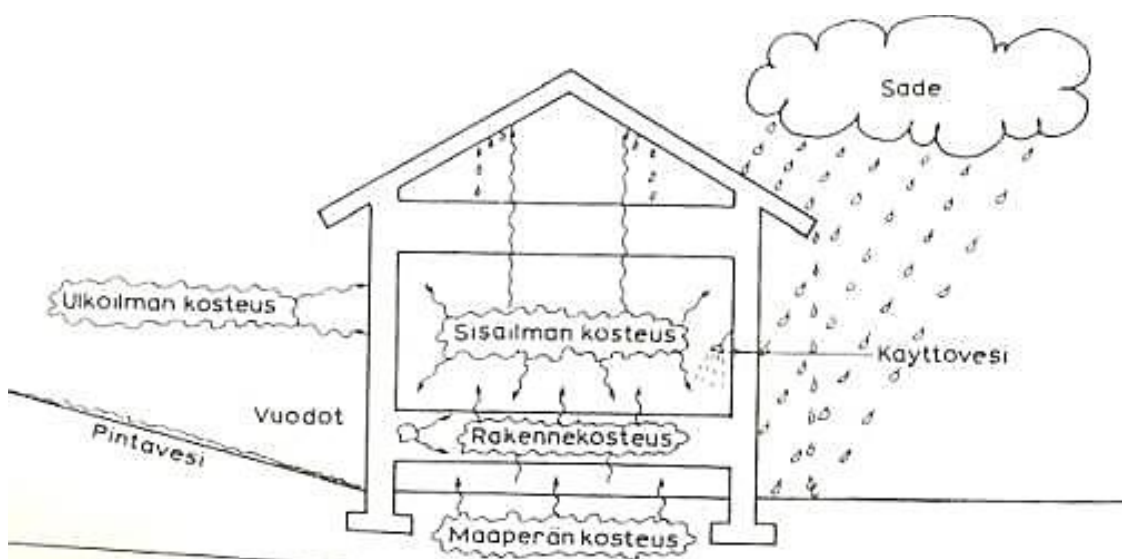
### 3.2 Kosteuden siirtyminen

Sekä ilma että rakennusmateriaalit sisältävät aina jonkin verran kosteutta. Ilmaan sitoutuneen kosteuden määrä riippuu lämpötilasta, kun taas materiaalin kosteuspitoisuuteen vaikuttaa ympäröivän ilman kosteuspitoisuuden lisäksi materiaalin huokosrakenne. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään rakentamisen ja rakennusten käytön yhteydessä esiintyviä kosteuslähteitä sekä kosteuden sitoutumista materiaaliin ja siirtymistä materiaalin

sisällä ja eri materiaalien välillä. Kosteuden siirtymismekanismeista käsitellään rakennusfysiikan kannalta keskeisimmät: diffuusio, konvektio ja kapillaarinen siirtyminen.

### 3.2.1 Kosteuslähteet

Rakennuksissa esiintyvä kosteus on pääosin peräisin neljästä lähteestä: sateesta, ilman ja maaperän kosteudesta sekä materiaaleihin sitoutuneesta rakennusaikaisesta kosteudesta. Nämä kosteuslähteet on esitetty kuvassa 3.3. Näiden lisäksi rakenteisiin saattaa poikkeustilanteissa päästä vettä esimerkiksi tontin pintavesien valuessa kohti rakennusta tai rikkoutuneen putken tai märkätilan vedeneristyksen vuotaessa. Myös normaaliin asumiseen liittyvä veden käyttö rakennuksen sisällä, kuten pyykin peseminen ja kuivaus, saunominen ja ruoanlaitto, altistaa rakenteita kosteudelle. (Vinha 2011)

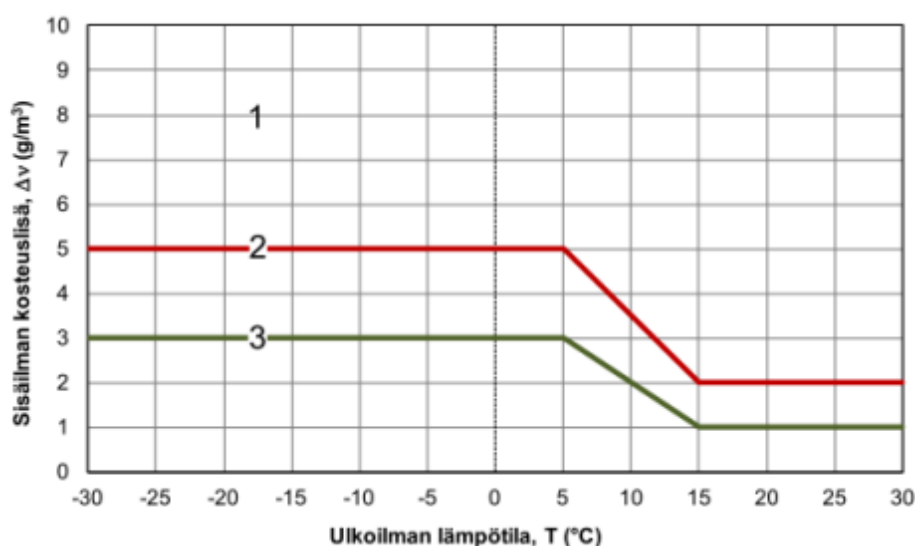


**Kuva 3.3.** Rakennuksen kosteuslähteet (Sisäilmayhdistys).

Sade rasittaa rakennusta sekä sen rakentamisen että käytön aikana. Valmiin rakennuksen vaakapintoja kastelee pystysuora sade ja pystypintoja tuulen aikaansaama viistosade. Viistosade rasittaa erityisesti rakennuksen yläosia ja nurkkia, ellei niitä ole suojattu räystäillä. Pinnan laadusta ja materiaalista riippuen sateen muodostama vesikalvo voi valua pintaa pitkin tai imeytyä materiaaliin. Painovoima saa sadeveden valumaan vienoilla ja pystypinnoilla alaspäin, mutta tuuli voi kuljettaa vettä ja lunta pinnoilla myös ylöspäin, jolloin kosteutta voi päästä rakenteiden sisään esimerkiksi räystäiden alta tai vesikatteen liitoksien välistä. Rakennuksen sijainti ja muoto vaikuttavat rakenteisiin kohdistuvan viistosateen määrään. Rakennusaikana sadevesi voi kastella suojaamattomia rakennustarvikkeita ja rakenteita aiheuttaen vaurioita ja pidentäen valmiiden rakenteiden kuivumisaikaa. (Björkholtz 1997)

Ulkoilma sisältää aina jonkin verran kosteutta eli vesihöyryä, joka määrättyissä olosuhteissa pyrkii siirtymään rakenteisiin ja tiivistymään ilmaa viileämmille pinnoille (RIL

107–2012). Ilman sitoman vesihöyryn maksimimäärä riippuu lämpötilasta: mitä korkeampi ilman lämpötila on, sitä enemmän se pystyy sitomaan kosteutta. Ulkoilman sisältämän vesihöyryn määrä vaihtelee siten vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan. Ulkoilman kosteus vaikuttaa myös sisäilman kosteuspitoisuuteen. Asuinrakennusten sisäilmassa kosteutta on kuitenkin tyypillisesti enemmän kuin ulkoilmassa, mikä johtuu ihmisten, kasvien ja vedenkäytön sisäilmaan tuottamasta kosteuslisästä. (Björkholtz 1997) Kosteuslisänä asuintaloissa voidaan käyttää Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeiden (RIL 107–2012) mukaisia arvoja, jotka on esitetty kuvassa 3.4. Asuinrakennukset kuuluvat ohjeen mukaan luokkaan 2, joten niissä kosteuslisä on talvella  $5 \text{ g/m}^3$  ja kesällä  $2 \text{ g/m}^3$ . Sisäilman kosteuspitoisuutta ja sen vaihtelua ohjataan ilmanvaihdolla. Lisäksi kosteutta sitovat ja luovuttavat hygroskooppiset rakennusmateriaalit voivat tasata sisäilman kosteuspitoisuuden vaihtelua.



**Kuva 3.4.** Sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona (RIL 107–2012).

Maassa kosteutta esiintyy pintavetenä, kapillaari- ja vajovetenä, pohjavetenä sekä maan aineksen huokosilmassa olevana vesihöyrynä. Maaperän kosteusolosuhteet riippuvat pohjaveden korkeudesta, maalajista sekä kuivatus- ja salaojitusjärjestelmistä. Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa maan huokosilman suhteellisen kosteuden usein oletetaan kuitenkin olevan jatkuvasti 100 %. (Björkholtz 1997; RIL 107–2012) Maassa oleva kosteus vaikuttaa maanvastaisten rakenteiden, kuten perustusten ja alapohjien, kosteuspitoisuuteen. Erityisesti maaperässä kapillaarisesti nouseva vesi voi maalajista riippuen aiheuttaa merkittävän kosteusrasituksen rakennukselle.

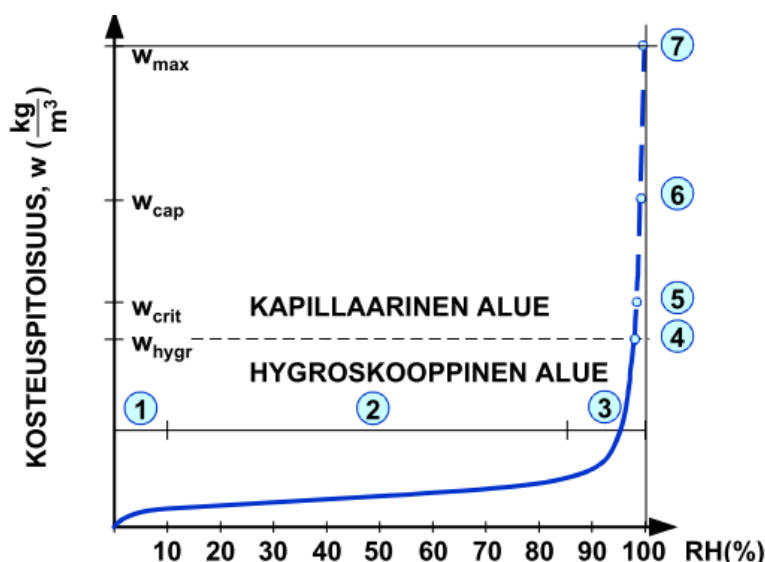
Rakentamisen jälkeen rakenteissa on usein ylimääräistä kosteutta, jonka on kuivuttava ennen kuin rakenne saavuttaa kosteustasapainon ympäröivän ilman kanssa. Tämä rakennekosteus on peräisin rakennusmateriaalien ja -tuotteiden valmistusprosessista sekä niiden kuljetuksen, varastoinnin ja asennusvaiheen aikaisesta kastumisesta. Rakenne-

kosteuden määrä riippuu materiaalista ja rakenteen työnaikaisesta suojauksesta. (Björkholtz 1997; RIL 107–2012) Esimerkiksi puussa ylimääräistä kosteutta on rakennusaikana tyypillisesti  $20 \text{ kg/m}^3$  ja betonissa  $70\text{--}120 \text{ kg/m}^3$  (Vinha 2011).

### 3.2.2 Kosteus materiaalissa

Kosteutta voi sitoutua materiaaliin eri tavoilla: kemiallisesti ja fysikaalisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi ei poistu materiaalista höyrystämällä, sillä se on osa hydraateiksi kutsuttujen aineiden rakennetta. (Vinha 2011) Siten kemiallisesti sitoutunut vesi ei myöskään vaikuta materiaalin kosteustekniseen käyttäytymiseen (Björkholtz 1997). Fysikaalisesti sitoutunut vesi taas voi olla materiaalin huokosseinämiin pintavoimilla kiinnittynyttä adsorptiovetä, huokosissa kapillaari-imun tai ulkoisen paineen voimasta liikkuvaa vettä tai huokosilmassa olevaa vesihöyryä, joka liikkuu diffuusion avulla. (Vinha 2011)

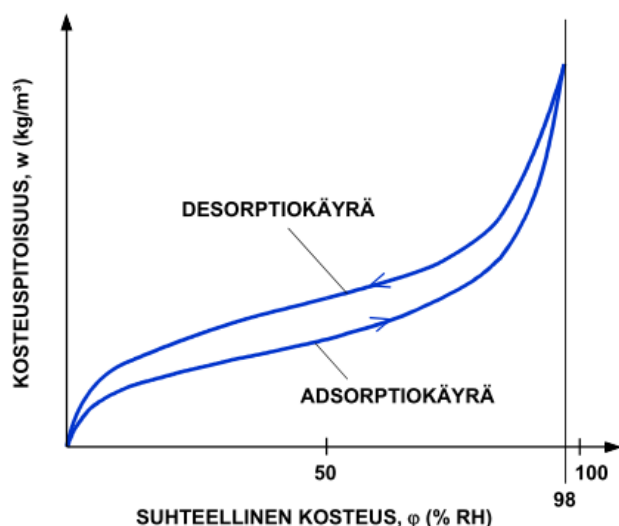
Monilla rakentamisessa käytettävillä materiaaleilla on kyky sitoa itseensä kosteutta ja luovuttaa sitä takaisin ympäristöönsä. Tällaisia materiaaleja kutsutaan hygroskooppisiksi. Hygroskooppiset materiaalit pyrkivät aina tasapainokosteuteen, eli tasapainoon ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa, sitomalla ilman kosteutta itseensä tai luovuttamalla kosteutta ilmaan. Tasapainokosteus on kullekin materiaalille ominainen kosteuspitoisuus, joka riippuu ympäröivän ilman suhteellisesta kosteudesta. Materiaalin hygroskooppisuutta kuvataan kuvan 3.5 mukaisella hygroskooppisella tasapainokosteuskäyrällä, joka esittää materiaalin kosteuspitoisuuden ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Tasapainokosteuskäyrän muoto riippuu voimakkaasti materiaalin huokosrakenteesta, eli huokostilavuudesta suhteessa koko materiaalin tilavuuteen ja huokosten kokojakaumasta. Tasapainokosteuskäyrä voidaan jakaa hygroskooppiseen alueeseen, jossa materiaali sitoo kosteutta ilmasta, ja kapillaariseen alueeseen, jossa kosteus siirtyy materiaaliin ja materiaalissa pääasiassa nestemäisessä muodossa. (Vinha 2011) Tasapainokosteus riippuu myös lämpötilasta, mutta yleensä käytetään kirjallisuudesta löytyviä  $20^\circ\text{C}$  lämpötilassa mitattuja käyriä (Ympäristöopas 28 1997).



**Kuva 3.5.** Esimerkki huokoisen materiaalin tasapainokosteuskäyrästä (Vinha 2011).

Hygroσκοoppinen kyllästyskosteuspitoisuus (piste 4) hygroσκοoppisen ja kapillaarisen alueen rajalla ilmoittaa, kuinka paljon materiaali pystyy enimmillään sitomaan kosteutta ilmasta, jonka lämpötila pyritään pitämään mahdollisimman vakiona. Pisteessä, jossa tasapainokosteuskäyrän kulmakerroin alkaa kasvaa voimakkaasti, alkaa kosteus siirtyä materiaalin pienimmissä huokosissa kapillaarisesti. Tätä alhaisemmassa suhteellisessa kosteudessa kapillaarivirtausta ei esiinny, vaan kosteuden siirtyminen tapahtuu kaasumaisessa muodossa. Kriittisen kosteuspitoisuuden (piste 5) ylittyttyä kosteuden siirtyminen tapahtuu jo pääosin nestemäisessä muodossa yhtenäistä kapillaariverkostoa pitkin. Piste 6 ilmoittaa materiaalin kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden: kuinka paljon materiaali voi enimmillään sitoa kosteutta ollessaan yhteydessä vapaaseen vedenpintaan. Tässä pisteessä kaikki kapillaarihuokokset ovat täyttyneet vedellä ja tätä korkeampia kosteuspitoisuuksia voidaan saavuttaa ainoastaan sijoittamalla materiaalikappale tyhjiöön, jolloin myös kaikkein suurimmat huokokset täyttyvät vedellä. Piste 7 on materiaalin maksimikosteuspitoisuus, jossa kaikki materiaalin huokokset ovat veden täyttämiä. (Björkholtz 1997; Vinha 2011; Siikanen 2014)

Materiaalin huokosrakenne aiheuttaa myös tasapainokosteuskäyrän hystereesiksi kutsutun ilmiön, jossa materiaalin tiettyä ilman suhteellista kosteutta vastaava tasapainokosteuden arvo riippuu siitä, lähestyykö materiaalin kosteuspitoisuus tätä arvoa kuivemasta (adsorptio) vai kosteammasta suunnasta (desorptio). Kuvassa 3.6 on havainnollistettu hystereesi-ilmiötä.



**Kuva 3.6.** Hystereesi-ilmiön vaikutus huokoisen materiaalin tasapainokosteuskäyrään (Vinha 2011).

Hystereesiä on selitetty niin kutsutulla mustepulloeefektillä, jonka saa aikaan materiaalin huokosverkoston kokojakauma. Kun materiaali kostuu, halkaisijaltaan pienimmät huokokset täyttyvät vedellä ensimmäisenä. Kuivan materiaalin kostuessa tiettyä suhteellista kosteutta vastaavaan kosteuspitoisuuteen kooltaan suurimmat huokokset eivät sen sijaan vielä täyty vedellä kapillaarisesti. Märän materiaalin kuivuessa tähän samaan suhteelliseen kosteuteen voi materiaalin kosteuspitoisuus jäädä korkeammaksi, jos suuremmissa huokosissa oleva vesi ei pääse poistumaan huokosista. Kapillaarivesi jää suuriin huokosiin, jos ne ovat yhteydessä muuhun huokosverkostoon ainoastaan halkaisijaltaan pienempien huokosten kautta, joissa vesi pysyy kapillaarivoimien ansiosta, ja jos yhtenäinen kapillaariverkosto on katkennut. Hystereesi-ilmiön vuoksi materiaalien tasapainokosteuskuvaajissa esitetään usein sekä kuivasta kostempaan että kostemmasta kuivempaan päin mitattu tasapainokosteuskäyrä. (Vinha 2011)

### 3.2.3 Vesihöyryn diffuusio

Diffuusio tarkoittaa kaasumolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevan yksittäisen kaasun pitoisuus- tai osapaine-erot. Rakennusfysiikassa tarkastellaan erityisesti rakenteiden läpi tapahtuvaa vesihöyryn diffuusiota, jonka saa aikaan vesihöyrypitoisuusero sisä- ja ulkoilman välillä. Diffuusion nettovirtaus tapahtuu aina korkeammasta vesihöyrypitoisuudesta matalampaan (Björkholtz 1997; Vinha 2011) ja siten rakennuksissa diffuusion suunta on tyypillisesti lämpimästä tilasta kylmempään päin. Diffuusion suunta on kuitenkin kylmemmästä tilasta lämpimämpään päin silloin, kun kylmemmän tilan vesihöyrypitoisuus on suurempi. (Siikanen 2014)

Homogeenisessa ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheyden  $g$  ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) laskemiseen käytetään Fickin lakia, joka voidaan esittää vesihöyrypitoisuuksien tai vesihöyryn osapaineiden avulla (Vinha 2011)

$$g = -\delta_v \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (3.25)$$

$$g = -\delta_p \nabla p_v = -\left(\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial y}, \delta_p \frac{\partial p_v}{\partial z}\right) \quad (3.26)$$

missä

|            |    |  |
|------------|----|--|
| $\delta_v$ | on | materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuseron avulla ilmaistuna ( $\text{m}^2/\text{s}$ )                                   |
| $v$        | on | vesihöyrypitoisuus ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  |
| $\delta_p$ | on | materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron avulla ilmaistuna ( $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ) |
| $p_v$      | on | vesihöyryn osapaine (Pa)   |

Stationääritilassa, yksiulotteisessa tapauksessa, kun vesihöyrypitoisuusjakauma on lineaarinen, saadaan materiaalikerroksen läpi siirtyvä kosteusvirran tiheys kaavasta (Vinha 2011)

$$g = -\delta_v \frac{v_2 - v_1}{d} = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (3.27)$$

missä

|            |    |  |
|------------|----|--|
| $v_1, v_2$ | on | vesihöyrypitoisuudet materiaalikerroksen eri puolilla ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |
| $d$        | on | materiaalikerroksen paksuus (m)  |

Kosteusvirta  $G$  ( $\text{kg}/\text{s}$ ) saadaan kertomalla kosteusvirran tiheys tarkasteltavan rakenteen pinta-alalla  $A$  ( $\text{m}^2$ ) (Vinha 2011)

$$G = g \cdot A \quad (3.28)$$

Vesihöyrynläpäisevyys on materiaalista, lämpötilasta ja huokosilman suhteellisesta kosteudesta riippuva ominaisuus. Sen avulla voidaan laskea materiaalin diffuusiovastuskerroin  $\mu$  (-), joka ilmoittaa ilman vesihöyrynläpäisevyyden suhteessa materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen. Diffuusiovastuskertoimen ja materiaalikerroksen paksuuden perusteella voidaan edelleen laskea materiaalin suhteellinen diffuusiovastus  $s_d$  (m) (Vinha 2011)

$$\mu = \frac{D_a}{\delta_v} = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p} \quad (3.29)$$

$$s_d = \mu \cdot d \quad (3.30)$$

Materiaalikerroksen vesihöyrynvastus  $Z_v$  ( $\text{s}/\text{m}$ ) saadaan kaavalla (Vinha 2011)

$$Z_v = \frac{d}{\delta_v} \quad (3.31)$$



Useista homogeenisista materiaalikerroksista koostuvan rakenteen vesihöyrynvastus  $Z_{v,tot}$  (s/m) saadaan laskemalla yhteen kaikkien kerrosten vesihöyrynvastukset sekä rakenteen sisä- ja ulkopintojen vesihöyrynvastukset  $Z_{v,si}$  ja  $Z_{v,se}$ . (Vinha 2011)

$$Z_{v,tot} = Z_{v,si} + Z_{v,1} + Z_{v,2} + \dots + Z_{v,n} + Z_{v,se} \quad (3.32)$$

Huokosilman vesihöyrypitoisuus  $v$  (kg/m<sup>3</sup>) etäisyydellä  $x$  materiaalin pinnasta lasketaan stationääritilanteessa kaavalla (Vinha 2011)

$$v_x = v_i - \frac{\sum_{n=i}^x Z_{v,n}}{Z_{v,tot}} (v_i - v_e) \quad (3.33)$$

missä

$\sum_{n=i}^x Z_{v,n}$  rakenteen vesihöyrynvastusten summa sisäilmasta kohtaan  $x$  (s/m)

$v_i$  on sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)

$v_e$  on ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m<sup>3</sup>)

Pinnan kosteudensiirtokerroin  $\beta_v$  (m/s) saadaan kaavasta (Vinha 2011)

$$\beta_v = \frac{h_{conv}}{\rho_a c_{pa}} \quad (3.34)$$

missä

$h_{conv}$  on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>·K))

Pinnan vesihöyrynvastus  $Z_{v,s}$  (s/m) on (Vinha 2011)

$$Z_{v,s} = \frac{1}{\beta_v} \quad (3.35)$$

Pinnasta ilmaan siirtyvä kosteusvirran tiheys (Vinha 2011)

$$g = \beta_v (v_s - v_a) \quad (3.36)$$

Jos huokosilman vesihöyrypitoisuus ylittää jossakin rakenteen kohdassa kyseisen kohdan lämpötilaa vastaavan kyllästyskosteuspitoisuuden, ylimääräinen vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi eli kondensoitua. Tämä kondenssitilanne jatkuu ja tiivistyneen veden määrä kasvaa, kunnes olosuhteet rakenteessa muuttuvat kuivemmiksi. Tietyn aikajakson kuluessa rakenteessa alueelle A-B tiivistyvän veden määrä  $m''_{cond}$  (kg/m<sup>2</sup>) voidaan laskea kaavasta (Vinha 2011)

$$m''_{cond} = \left( \frac{v_i - v_B}{Z_{v,B}} - \frac{v_A - v_e}{Z_{v,A}} \right) t_{cond} \quad (3.37)$$

missä

|            |    |   |
|------------|----|---|
| $Z_{v,B}$  | on | sisäilman ja kondenssikohdan välisten materiaalikerrosten vesihöyrynvastusten summa (s/m) |
| $Z_{v,A}$  | on | ulkoilman ja kondenssikohdan välisten materiaalikerrosten vesihöyrynvastusten summa (s/m) |
| $t_{cond}$ | on | kondensoitumisaika (s)  |

Kondensoituvan kosteuden määrää kaavalla (3.37) laskettaessa rakenteen oletetaan olevan stationääritilassa ja kosteuden sitoutumista rakennekerrokseen ei oteta huomioon. Vastaavasti rakenteesta kuivuvan kosteuden määrä  $m''_{dry}$  (kg/m<sup>2</sup>) kuivumisajan  $t_{dry}$  (s) aikana voidaan laskea kaavalla (Vinha 2011)

$$m''_{dry} = \left( \frac{v_A - v_e}{Z_{v,A}} - \frac{v_B - v_i}{Z_{v,B}} \right) t_{dry} \quad (3.38)$$

Pitkällä aikavälillä tarkasteltuna rakenteeseen kondensoituvan kosteuden tulee päästä kuivumaan rakenteesta kuivumisjakson aikana. Rakenteeseen ei siis saa syntyä kasvavaa kosteuskertymää vuosien kuluessa. (Björkholtz 1997) Liiallinen kosteuden kondensoituminen voi kuitenkin aiheuttaa rakenteeseen kosteusvaurion jo yhden tiivistymisjakson aikana ennen kuivumisjakson alkua.

### 3.2.4 Kosteuden konvektio

Kosteuden konvektiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa ilman sisältämää vesihöyryä siirtyy ilmavirtauksen mukana paikasta toiseen. Ilmiö on analoginen konvektiivisen lämmön siirtymisen kanssa. Ilmavirtauksen saa aikaan ilmanpaine-ero rakennusvaipan sisä- ja ulkopuolen välillä tai rakenteen sisällä. Ilmapaine-erot voivat aiheutua lämpötilaeroista, tuulesta tai esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimista kuten on esitetty lämmön konvektion yhteydessä luvussa 3.1.2. (Björkholtz 1997)

Kosteuden konvektiota tapahtuu ilman virratessa rakenteessa olevien rakojen ja reikien kautta. Jos rakenteen läpi virtaava ilmamäärä tunnetaan, saadaan konvektiolla siirtyvä kosteusvirran tiheys  $g_{conv}$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)) kaavasta (Vinha 2011)

$$g_{conv} = r_a(v_1 - v_2) \quad (3.39)$$

missä

|            |    |   |
|------------|----|---|
| $r_a$      | on | ilmavirran tiheys (m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·s))           |
| $v_1, v_2$ | on | vesihöyrypitoisuudet eri puolilla rakennetta (kg/m <sup>3</sup> ) |

Kaava (3.39) ottaa huomioon sen, että ilman virratessa raon tai reiän kautta rakennuksen sisältä ulos tulee samanaikaisesti ulkoa sisälle vastaava määrä korvausilmaa, joka myös sisältää vesihöyryä. Tuloksena saadaan siten konvektiolla siirtyvän kosteusvirran tiheyden nettoarvo. Kun rakenteen eri puolten välillä vallitsee lämpötilaero ja ilmavirtaus

tapahtuu rakenteen lämpimämmältä puolelta kylmemmälle puolelle, on mahdollista, että osa raon tai reiän läpi virtaavasta vesihöyrystä kondensoituu rakenteeseen. Näin tapahtuu silloin, kun (Vinha 2011)

$$v_i \geq v_{sat,mat}(T^-) \quad (3.40)$$

missä

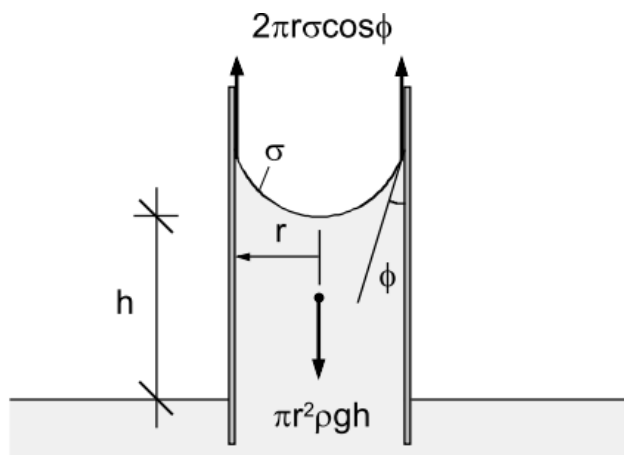
$v_i$  on rakenteeseen virtaavan lämpimän ilman vesihöyrypitoisuus ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v_{sat,mat}(T^-)$  huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus rakenteen kylmässä pinnassa ( $\text{kg/m}^3$ )

Vastaavalla tavalla rakenteesta voi poistua kosteutta ilmavirtauksen mukana, mikäli ilma virtaa kylmältä puolelta lämpimämmälle puolelle ja virtaavan ilman vesihöyrypitoisuus on pienempi kuin materiaalin huokosilman vesihöyrypitoisuus materiaalin lämpimässä pinnassa. Myös ulkoilmaan avoimessa tuuletusvälissä tapahtuva konvektio voi joko kuivattaa tai kostuttaa tuuletusvälin ilmaa riippuen virtaavan ilman vesihöyrypitoisuudesta suhteessa tuuletusvälin ilman vesihöyrypitoisuuteen. (Vinha 2011) Esimerkiksi yläpohjan tuuletustilassa tapahtuva konvektio voi aiheuttaa kosteuden tiivistymistä aluskatteen alapintaan ja kattoristikoiden kylmiin osiin (Björkholtz 1997).

Luvussa 3.1.2 käsitelty lämpötilaerojen aiheuttama sisäinen konvektio vaikuttaa paitsi lämmön, myös kosteuden siirtymiseen rakenteissa. Sisäisessä konvektiossa lämpimän ilman sitoma kosteus siirtyy ilmavirtauksen mukana kohti rakenteen kylmempää pintaa. Samalla ilma jäähtyy, jolloin sen sisältämä kosteus saattaa tiivistyä vedeksi. Tyypillisiä sisäisen konvektion aiheuttamia kondenssialueita ovat seinärakenteissa paksun lämmöneristekerroksen ulkopinta seinän yläosassa ja yläpohjarakenteissa vastaavasti lämmöneristekerroksen yläpuolisten materiaalien pinnat. Sisäisen konvektion vaikutus kasvaa, jos lämmöneristekerroksen paksuutta lisätään tai jos sen reunoille on asennettaessa jäänyt rakoja. (Vinha 2011)

### 3.2.5 Kapillaarinen kosteuden siirtyminen

Useilla rakentamiseen käytettävillä huokoisilla materiaaleilla on kyky vesikontaktissa ollessaan imeä vettä itseensä ja siirtää sitä eteenpäin. Tätä huokosalipaineen aiheuttamaa nesteen siirtymistä huokoisessa aineessa kutsutaan kapillaarivirtaukseksi. Rakenusfysiikassa tarkastellaan nimenomaan veden kapillaarista liikkumista huokoisissa materiaaleissa. (Björkholtz 1997)



**Kuva 3.7.** Huokosalipaine ja hydrostaattinen paine kapillaarihuokosta kuvaavassa kaapeassa, pyöreässä putkessa (Vinha 2011).

Veden kapillaariliikkeen saavat aikaan materiaalin huokosissa olevan veden sisäiset koheesiovoimat sekä veden ja huokosseinämän välinen adheesio. Näiden voimien seurauksena syntyy veden pintajännitys ja veden pinta kaareutuu kuvan 3.7 esittämällä tavalla, jolloin veden pinnan ja ilman välille syntyy paine-ero, huokosalipaine. Huokosalipaineen vaikutuksesta vesi nousee huokosputkessa tasolle, joka on tasapainossa huokosputkessa olevan veden synnyttämän hydrostaattisen paineen kanssa kaavan (3.41) mukaisesti. (Hagentoft 2001; Vinha 2011)

$$\rho_w g h = s = \frac{2\sigma}{r} \cos \phi \quad (3.41)$$

missä

|          |    |   |
|----------|----|---|
| $\rho_w$ | on | veden tiheys ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ 27 °C lämpötilassa)  |
| $g$      | on | putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )                       |
| $h$      | on | kapillaarinen nousukorkeus (m)                                    |
| $s$      | on | huokosalipaine (s)  |
| $\sigma$ | on | veden pintajännitys ( $0,073 \text{ N/m}$ 20 °C lämpötilassa)     |
| $r$      | on | huokosputken säde (m)   |
| $\phi$   | on | reunakulma kaareutuneen vesipinnan ja putken seinämän välillä (°) |

Kaavasta (3.41) nähdään, että mitä pienempi on huokosputken säde, sitä suurempi on vesipatsaan kapillaarinen nousukorkeus. Useimmilla kapillaarisilla rakennusmateriaaleilla reunakulma  $\phi$  on likimain  $0^\circ$ , jolloin kapillaarinen nousukorkeus voidaan laskea kaavasta (Vinha 2011)

$$h = \frac{2\sigma}{\rho_w g r} \quad (3.42)$$

Kapillaarinen nousukorkeus kuvaa sitä korkeutta, johon vesi voi huokosputkessa korkeimmillaan nousta vapaaseen vedenpintaan nähden. Nousukorkeus riippuu materiaalis-

ta. Erityisesti kapillaarinen kosteuden siirtyminen on otettava huomioon eri maalajeja tarkasteltaessa. Karkearakeisten maalajien kapillaariset nousukorkeudet ovat pienimmillään vain joitakin senttimetrejä, kun taas hienorakeisen saven ja siltin kapillaarinen nousukorkeus voi olla yli kymmenen metriä. (Vinha 2011)

Kuivan materiaalin ollessa alaosaan kosketuksissa veden kanssa voidaan kapillaarisen kosteusvirran tiheyden maksimiarvo  $g_{cap}$  (kg/(m<sup>2</sup>·s)) laskea kaavasta (Hagentoft 2001; Vinha 2011)

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (3.43)$$

missä

$A_w$  on materiaalin kapillariteettikerroin (kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup>))  
 $t$  on aika (s)

Kapillariteettikerroimen arvo ei ole vakio vaan se alkaa pienentyä nopeasti materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa. Materiaaliin kapillaarisesti imeytyvän veden määrä siis vähenee materiaalin kastuessa. Kapillaarivirtaus loppuu kokonaan materiaalin saavuttaessa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuuden. (Vinha 2011)

Veden kapillaarista siirtymistä voi tapahtua silloinkin, kun materiaali ei ole suorassa vesikosketuksessa. Jos materiaalin kosteuspitoisuus on korkea, voi kapillaarivirtausta tapahtua paitsi alhaalta ylöspäin, myös vaakasuunnassa ja ylhäältä alaspäin. Yleisessä tapauksessa kapillaarinen kosteusvirran tiheys esitetään Darcyn lain avulla. (Vinha 2011)

$$g_{cap} = -\rho_w \frac{k}{\eta_w} \frac{\partial p}{\partial x} = -k_w \frac{\partial s}{\partial x} \quad (3.44)$$

missä

$k$  on materiaalin permeabiliteetti (m<sup>2</sup>)  
 $\eta_w$  on veden dynaaminen viskositeetti (1,31 x 10<sup>-3</sup> N·s/m<sup>2</sup> 10 °C lämpötilassa)  
 $k_w$  on materiaalin kosteudenjohtavuus (kg/(m·s·Pa))

Kosteudenjohtavuus kasvaa materiaalin kosteuspitoisuuden kasvaessa. Samalla kapillaarivirtaus materiaalissa lisääntyy, kun pienimmät huokoset alkavat täyttyä vedellä. Hygrooskooppisella alueella (RH < 98 %) kapillaarivirtaus on kuitenkin tavallisesti vähäistä ja kosteudenjohtavuus pieni. Huokosilman suhteellisen kosteuden noustessa hygrooskooppisen kyllästyskosteuden yläpuolelle kasvaa materiaalin kosteudenjohtavuus voimakkaasti. Materiaalin kosteuspitoisuuden edelleen kasvaessa kapillaarivirtaus vähenee loppuen kokonaan, kun materiaali saavuttaa kapillaarisen kyllästyskosteuspitoisuutensa. Kapillaarivirtaus loppuu myös materiaalin huokosissa olevan veden jäätyessä.

Pienissä huokosissa vallitsevan alipaineen vuoksi veden jäätymistä ei kuitenkaan välttämättä tapahdu lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n, joten kapillaarivirtausta voi esiintyä, vaikka materiaalin lämpötila olisi pakkasen puolella. (Vinha 2011)

### 3.3 Ilma- ja kosteusvuodot

Rakennusfysiikan kannalta on olennaista tarkastella ehjien, ideaalisella tavalla toimivien rakenteiden ohella tapauksia, joissa rakenteessa on jokin ei-toivottu, rakenteen lämpö- tai kosteusteknistä toimintavarmuutta heikentävä virhe. Tällaisten tarkastelujen avulla saadaan tietoa rakenteen vikasietoisuudesta: siitä, miten herkästi rakenteen toimivuus heikkenee sen altistuessa suunniteltua voimakkaammalle rasitukselle. Vaipparakenteissa tarkastelun kohteena voivat olla erilaiset ilma- ja kosteusvuodot joko ulkoilmasta tai sisäilmasta rakenteen sisään. Lisäksi rakennuksissa voi esiintyä yllättäviä putkivuotoja ja laitevikoja, joista voi aiheutua rakenteille merkittävää kosteusrasitusta. Tässä luvussa käsitellään kuitenkin diplomityön rajauksen vuoksi ainoastaan yläpohjarakenteille tyypillisiä sade- ja ilmavuotoja ja niistä aiheutuvia haittoja.

Yläpohjarakenteiden ulkopinta on toistuvasti alttiina sateelle. Jos vesikate ja mahdollinen aluskate eivät ole kauttaaltaan vesitiiviitä, voi sadevettä päästä vuotamaan rakenteen sisään. Vuotovesi valuu painovoimaisesti alaspäin rakenteessa päätyen lopulta kantavien puurakenteiden, kuten kattoristikoiden, pinnoille ja lämmöneristekerrokseen. Sadevuoto aiheuttaa usein merkittävää paikallista kosteusrasitusta vuotokohdan läheisyydessä. Ylimääräinen kosteus voi lopulta poistua rakenteesta ainoastaan haihtumalla, mikä pitää yläpohjan tuuletustilan ilman pitkään tavallista kosteampana. (Vinha et al. 2013) Painovoimaisesti valuva ja kapillaarisesti siirtyvä vesi aiheuttavat suurimman osan kaikista rakennusten kosteusvaurioista, koska lyhyessäkin ajassa siirtyvän veden määrä voi olla varsin suuri verrattuna diffuusiolla ja konvektiolla siirtyvän kosteuden määrään (Vinha 2011). Vuotovesi pääsee yläpohjarakenteen sisään tyypillisesti erilaisista vesikatteen epäjatkuvuuskohdista, kuten katemateriaalin saumoista, putkiläpivientien, kattoikkunoiden ja kattokaivojen kohdalla sekä alemman kattopinnan ja ulkoseinän liitoskohdasta ja räystäiltä (Ympäristöopas 28 1997). Tämän perusteella sadevuotoja voidaan estää parhaiten panostamalla rakennedetaljien suunnitteluun ja toteuttamalla rakenteet liitoksineen huolellisesti.

Toinen yläpohjarakenteiden yhteydessä tarkasteltava vuotoilmiö on ilmavuoto rakennuksen sisätiloista yläpohjaan. Nykyisin rakennuksista pyritään yleensä tekemään lämpö- ja kosteusteknisistä syistä mahdollisimman ilmatiiviitä, joten yläpohjarakenteissa on höyryn- tai ilmansulkukerros tai ilmatiivis lämmöneristemateriaali, joka estää sisäilman pääsyn rakenteeseen. Ilmavuodon syntyminen vaatii tällöin reiän tai raon tähän ilmatiiviiseen kerrokseen sekä lisäksi paine-eron rakenteen sisä- ja ulkopuolen välille (Björkholtz 1997). Ilmavuoto perustuu rakenteen yli vallitsevan paine-eron aikaansaamaan pakotettuun konvektioon, joka on rakenteen toiminnan kannalta haitallisin silloin, kun

sisätila on ylipaineinen rakenteen ulkopuoleen nähden. Kostean ja lämpimän sisäilman virratessa ylipaineisesta sisätilasta kohti rakenteen viileämpiä ulko-osia ilman sisältämä vesihöyry alkaa tiivistyä ja kertyä rakenteeseen. Talvella sisältä tuleva kosteus voi kertyä jopa jääksi kohdatessaan riittävän kylmän pinnan lämmöneristekerroksen ulko-osissa. Konvektiolla rakenteeseen kulkeutuva kosteusmäärä voi olla moninkertainen diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrään verrattuna. Jos sen sijaan kylmä ulkoilma on ylipaineinen sisäilmaan nähden, ei tilanne ole kosteusteknisesti yhtä haitallinen. Tällöin ilma lämpenee kohti rakenteen sisäpintaa kulkiessaan ja pystyy siten sitomaan itseensä enemmän kosteutta, jolloin rakenne voi kuivua. (Siikanen 2014)

Vaipparakenteiden läpi tapahtuvilla ilmavuodoilla on monia haitallisia vaikutuksia niin asumismukavuuden, rakennuksen energiataloudellisuuden kuin rakenteiden toiminnan kannalta. Rakenteisiin ilmavuodot voivat aiheuttaa suurta pistemäistä kosteusrasitusta, joka voi vaurioittaa rakenteita aiheuttaen esimerkiksi homeen kasvua ja erilaisia ulkonäköhaittoja, kuten pintojen likaantumista. Ilmavuodot voivat heikentää asumismukavuutta tuomalla mukanaan epäpuhtauksia sisäilmaan ja aiheuttamalla vedontunnetta sisätiloissa. Lisäksi ilmavuodot kasvattavat ajan kuluessa rakennuksen lämmitysenergiankulutusta, jos lämmintä ilmaa karkaa jatkuvasti rakenteiden läpi. Ilmavuotoja esiintyy tyypillisimmin erilaisten läpivientien, saumojen ja rakenteiden välisten liitosten kohdalla. Vuotoja voidaan estää huolellisella ilman- tai höyrynsulkukerroksen saumojen tiivistämisellä ja välttämällä ilmatiiviin kerroksen tarpeetonta puhkaisua sekä käyttämällä tarvittaessa asianmukaisia läpivientikappaleita. (Vinha 2011)

### 3.4 Suomen ilmasto ja ilmastonmuutos

Ulkoilmassa vallitsevilla olosuhteilla on keskeinen rooli rakennusfysikaalisissa tarkasteleissa. Ulkoilman lämpötila, suhteellinen kosteus, sateet, tuuli ja auringonsäteily vaikuttavat kaikki yhdessä rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Siksi on tiedettävä, minkälaiset olosuhteet ovat tyypillisiä Suomen ilmastolle ja minkälaisia haasteita ne asettavat rakenteiden suunnittelulle. Jotta rakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus voitaisiin varmistaa myös tulevana vuosikymmeninä, on olennaista pyrkiä ennustamaan, miten ilmastonmuutos muuttaa suomalaista ilmastoa tulevaisuudessa.

Ulkolämpötila ja sen vaihtelut vaikuttavat paitsi rakennuksen lämmitysenergiankulutukseen ja vaadittaviin lämmöneristepaksuuksiin, myös kosteuden tiivistymiseen, veden jäätymiseen ja toisaalta rakenteiden kastumiseen ja kuivumiseen yhdessä ulkoilman suhteellisen kosteuden kanssa. Siten ulkoilman lämpötilalla on huomattava merkitys sekä rakenteiden lämpöteknisen toiminnan että kosteusteknisen käyttäytymisen kannalta. Ulkolämpötila riippuu suurimmaksi osaksi maahan tulevan auringonsäteilyn määrästä, joka vaihtelee rakennuksen sijainnin, vuodenajan, vuorokaudenajan ja pilvisyyden mukaan. Rakenteiden lämpötilaan vaikuttaa suoraan auringosta tulevan lämpösäteilyn lisäksi pilvistä ja ilmakehän hiukkasista heijastuva diffuusi säteily. Aurinkoisina päivinä

auringonsäteily lämmittää Maata enemmän kuin pilvisinä päivinä nostaen samalla lämpötilaa myös rakenteissa, mutta toisaalta pilvettöminä öinä lämpösäteilyä karkaa ilmakehän läpi takaisin avaruuteen ja rakenteet jäähtyvät. (Vinha 2011) Pilvisyys siis sekä vaikeuttaa lämmittävän säteilyn pääsyä Maan pinnalle että estää maan pinnalta lähtevän lämpösäteilyn poistumista ilmakehän ulkopuolelle.

Suomen ilmaston tunnusomainen piirre on sen vaihtelevuus. Suomi sijaitsee kylmien ja lämpimien ilmamassojen raja-alueella, jossa esiintyy usein matalapaineita. Ne tuovat mukanaan lämmintä ilmaa ja sateita. Toisaalta Euraasian mantereen jäähtyminen talvella aiheuttaa pitkiäkin pakkasjaksoja Suomeen. (Siikanen) Suomalaiselle ilmastolle onkin tyypillistä kosteus- ja sadeolojen epäsäännöllinen vaihtelu riippuen siitä, mistä suunnasta ilmavirtaukset ja matala- ja korkeapaineet milloinkin tulevat (Ilmatieteen laitos 2014a).

Nykyilmastossa vuotuinen keskilämpötila Suomessa on sijainnista riippuen  $-2...+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vuoden korkeimman ja alimman lämpötilan ero on kuitenkin huomattavan suuri: kesän korkeimmat lämpötilat ovat  $+32...+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja talven alimmat  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ :sta Lapin jopa  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een. Rannikkoalueilla lämpötilojen vaihteluväli on tyypillisesti hiukan sisämaata pienempi. (Ilmatieteen laitos 2014a) Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihtelee vastavasti vuodenaikojen ja sijainnin mukaan ollen keväällä ja kesällä noin 60...80 % ja syksyllä sekä talvella 80...90 % (Vinha 2011). Vuotuinen sademäärä on Suomessa noin 500...650 mm, mihin on laskettu mukaan myös vedeksi muutetut lumisateet (Ilmatieteen laitos 2014a).

Ilmatieteen laitos (2014a) on tehnyt lukuisilla ilmastomalleilla ennusteita Suomen ilmaston muuttumisesta likimain vuoteen 2100 asti. Näiden ennusteiden mukaan ilmasto muuttuisi Suomessa enemmän talvella kuin kesällä. Talviaikaiset lämpötilat näyttäisivät kohoavan ja hyvin alhaiset lämpötilat muuttuvan entistä harvinaisemmiksi. Kesällä heljaksot yleistyvät ja kaikkein korkeimmat lämpötilat kohoavat. Keskilämpötilojen nousu aiheutuu kasvihuonekaasuista ja Suomessa lämpeneminen on selvästi voimakkaampaa kuin maapallolla keskimäärin. Kasvihuonekaasupäästöjen lisääntyminen saattaa nostaa Suomen keskilämpötiloja  $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ :lla ennen vuosisadan loppua, mutta jos päästöjä saadaan hillittyä, voi lämpeneminen jäädä noin  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een.

Sademäärien ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa erityisesti talvisaikaan. Sademäärän lisäyksen arvioidaan olevan ennusteesta riippuen noin 10–40 % ja lämpötilojen kohotessa sateet tulevat yhä harvemmin lumena. Erityisesti rankkasateiden arvioidaan voimistuvan kaikkina vuodenaikoina, mutta talvella ja keväällä myös sadepäivien määrä lisääntyy jonkin verran. Kesällä poutajaksot saattavat sen sijaan pidentyä hieman. Syksyllä ja talvella tuulen nopeudet kasvavat hiukan. Kasvavat sademäärät merkitsevät myös lisääntyvää pilvisyyttä, jolloin talvista tulee entistä pimeämpiä ja maahan pääsee 10–15



% nykyistä vähemmän auringonsäteilyä. Kesäaikaisen auringonsäteilyn määrän muuttumisesta ei sen sijaan ole varmuutta. (Ilmatieteen laitos 2014a)

Ilmatieteen laitoksen ennusteiden perusteella voidaan päätellä, että tulevaisuuden ilmasto on rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta epäedullisempi kuin nykyilmasto. Kun ilmastomuutoksen seurauksena sademäärät ja ulkoilman suhteellinen kosteus kasvavat ja pilvisyys lisääntyy, muuttuvat etenkin rakenteiden ulko-osien olosuhteet otollisimmiksi homeen kasvulle ja kosteuden kondensoitumiselle. Samoista syistä rakenteiden kuivuminen hidastuu ja kuivumisajat pitenevät. Lisäksi erityisesti syys- ja talvikausina runsastuvat vesisateet yhdessä voimistuvien tuulien kanssa kasvattavat julkisivuihin kohdistuvaa viistosaderasitusta. (Vinha et al. 2013)

## 4 HOMEHTUMINEN

Tässä luvussa käsitellään ensin homehtumista ilmiönä sekä haittoja, joita voi aiheutua rakenteissa esiintyvistä homeen kasvusta. Sen jälkeen esitellään rakennusmateriaalien homehtumisen tutkimiseksi kehitetty homeen kasvun matemaattinen malli, jota hyödynnetään myöhemmin laskentatarkasteluissa.

### 4.1 Homeen kasvu ja sen aiheuttamat haitat

Homehtuminen on mikrobien aiheuttama biologinen vauriomekanismi, jota esiintyy usein kosteusteknisesti heikosti toimivissa rakenteissa. Homeitiöitä ja muita mikrobeja esiintyy luonnostaan kaikkialla ulko- ja sisäilmassa, mutta rakennuksissa ne alkavat kasvaa ja lisääntyä vasta, kun rakennuksen sisäpinnat tai rakenteet ovat riittävän pitkään tarpeeksi kosteita. Homehtumisesta voi olla merkittävää haittaa rakennuksen käytön kannalta. Homeet heikentävät sisäilman laatua ja homeille tai homeiden aineenvaihduntatuotteille altistuminen voi aiheuttaa rakennuksen käyttäjille esimerkiksi erilaisia limakalvojen ärsytysoireita, hengitystietulehduksia, allergisia sairauksia, väsymystä ja pahoinvointia. (Partanen et al. 1995; Palomäki 2000)

Homesienet pystyvät kasvamaan monenlaisilla kasvualustoilla, esimerkiksi puu-, kivi-, tiili-, betoni- ja maalipinnoilla sekä lämmöneristemateriaaleissa (Kokko et al. 1999; Vinha et al. 2013). Kasvaakseen homeet tarvitsevat riittävästi lämpöä, kosteutta, happea ja ravintoa. Useimmissa tapauksissa homeiden kasvua rakennuksissa voidaan estää ainoastaan pitämällä materiaalit riittävän kuivina, sillä lämpöä, happea ja ravintoa on rakenteissa lähes aina homeiden kannalta tarpeeksi. Homeet eivät kasva alle 80 % RH suhteellisessa kosteudessa ja niiden kasvu on erittäin hidasta vielä alle 90 % RH suhteellisessa kosteudessa. Jos ilman suhteellinen kosteus on pitkään yli 90 % RH ja lämpötila on samanaikaisesti välillä +10...+50 °C, homeen kasvu nopeutuu ja homeista alkaa muodostua haittaa. Alle 0 °C:n lämpötilassa homeet eivät kasva. Jos homeiden kasvualustana toimiva materiaali kuivuu liikaa, siirtyvät homeet lepotilaan jatkaakseen kasvuaan kosteusolosuhteiden muuttuessa jälleen suotuisammiksi. Homeiden kasvun kannalta määräävin tekijä onkin kosteus- ja lämpöolojen vaihtelu ajan kuluessa. (Kokko et al. 1999; RT 05-10710 1999)

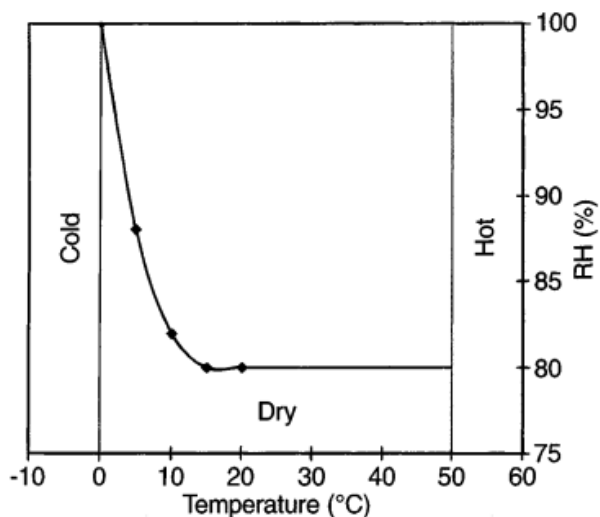
Homekasvun aikaansaamat terveyshaitat aiheutuvat homesienten itiöistä, homeiden myrkyllisistä aineenvaihduntatuotteista, allergeeneista ja sienirihmastojen kappaleista, joille ihminen altistuu hengitysilman kautta. (Partanen et al. 1995; Palomäki 2000) Itse rakennuksille ja rakenteille homeista aiheutuu sen sijaan lähinnä esteettistä haittaa, sillä

homekasvustoa esiintyy ainoastaan materiaalien pinnoilla. Rakenteiden teknisen toimivuuden kannalta homeita haitallisempia ovat lahottajasienet, jotka heikentävät monien rakennusmateriaalien lujuutta. Lahottajasienet vaativat kuitenkin kehittyäkseen korkeampia olosuhteita ja huomattavasti pidempää ajanjaksoa kuin homesienet. Lahottajasieniä esiintyykin tavallisesti vasta pitkäkestoisen kosteusvaurion seurauksena sen jälkeen, kun homesieniä on jo ilmestynyt materiaalin pinnalle. (Partanen et al. 1995; Kokko et al. 1999)

## 4.2 VTT:n ja TTY:n kehittämä parannettu homemalli

VTT:llä kehitettiin 1990-luvulla homeen kasvulle matemaattinen malli, jolla voitiin arvioida männyn ja kuusen pintapuun homehtumisriskiä muuttuvissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona. Vuosina 2005–2013 mallia laajennettiin VTT:n ja TTY:n yhteistyössä siten, että sitä voitaisiin käyttää muidenkin rakennusmateriaalien homehtumisriskin arviointiin. Tämä parannettu homemalli soveltuu käytettäväksi kaikille rakennusmateriaaleille. Mallin kehitystyössä käytettiin seuraavia materiaaleja: betoni, kevytbetoni, kevytsorabetoni, kuusiliimapuulevy, solupolystyreeni (EPS), polyuretaani, lasivilla ja polyesterikuitueriste. Mallin kehitystyössä hyödynnettiin laajoista materiaalien sekä rakenteiden laboratorio- ja kenttäkokeista saatuja tuloksia. Parannetun homemallin avulla voidaan tarkastella paitsi homeen kasvua materiaalikappaleiden pinnalla, myös erilaisten rakenteiden homehtumisriskiä vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Homeen kasvun määrittämiseen käytetään mallissa ns. homeindeksiä, joka ilmoittaa, onko homekasvu käynnistynyt ja kuinka suuri osa tutkittavasta pinnasta on homekasvuston peitossa. Homeindeksi tietyssä tarkastelupisteessä lasketaan kyseisestä pisteestä tunnin välein mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. (Vinha et al., Tutkimusraportti 143; Vinha et al. 2013) Tässä tutkimuksessa käytetään homehtumisriskin arviointiin parannettua homemallia.

Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet riippuvat vallitsevasta lämpötilasta kuvan 4.1 osoittamalla tavalla. Alle 0 °C:n ja yli 50 °C:n lämpötiloissa home ei kasva ja riittävän kylmät tai kuumat olosuhteet saattavat jopa tappaa homerihmaston. Näiden lämpötilojen välillä suhteellisen kosteuden tulee olla sitä korkeampi, mitä alhaisempi lämpötila on, jotta homeen kasvun käynnistyminen olisi mahdollista. (Kokko et al. 1999)



**Kuva 4.1.** Homeen kasvun kannalta suotuisat lämpötila- ja kosteusolosuhteet puumateriaalin pinnalla (Hukka & Viitanen 1999).

Silloin, kun olosuhteet eivät ole homeen kasvun kannalta riittävän kosteat, on kyseessä niin kutsuttu kuiva aika, joka hidastaa homeen kasvua tai pysäyttää sen kokonaan. Homeen kasvuun suotuisat ja epäsuotuisat kosteusolot määritetään kuvassa 4.1 esitetyn kriittisen rajakäyrän avulla seuraavasti (Kokko et al. 1999; Vinha et al., Tutkimusraportti 143)

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100,0, & \text{kun } T \leq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4.1)$$

missä

$RH_{min}$  on homekasvun alkamiseen vaadittava suhteellisen kosteuden minimiarvo taulukon 4.1 mukaisesti

Eri olosuhteissa saavutettavaa maksimaalista homeindeksiä kuvataan VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämässä parannetussa homemallissa homeindeksin maksimiarvolla  $M_{max}$  (-). Homeindeksin maksimiarvo voidaan laskea kaavalla (Vinha et al, Tutkimusraportti 143)

$$M_{max} = A + B \cdot \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C \cdot \left( \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (4.2)$$

missä

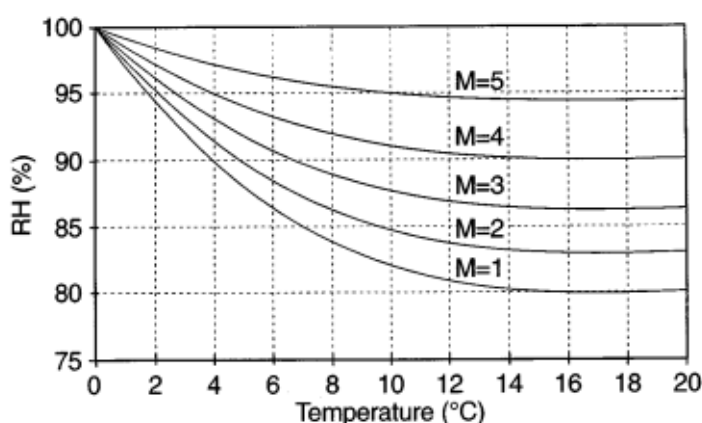
A, B, C on tutkittavasta materiaalista riippuvat kertoimet taulukon 4.1 mukaan (-)

RH on tarkasteluhetkellä vallitseva suhteellinen kosteus (-)

**Taulukko 4.1.** Homeen kasvun laskentakaavoissa käytettävät eri homehtumisherkkyysluokkien kertoimet ja suhteellisen kosteuden minimiarvot (Vinha et al., Tutkimusraportti 143).

| Homehtumisherkkyysluokka | $k_2 (M_{\max})$ |   |     | $RH_{\min}$ |
|--------------------------|------------------|---|-----|-------------|
|                          | A                | B | C   |             |
| hyvin herkkä             | 1                | 7 | 2   | 80          |
| herkkä                   | 0,3              | 6 | 1   | 80          |
| kohtalaisen kestävä      | 0                | 5 | 1,5 | 85          |
| kestävä                  | 0                | 3 | 1   | 85          |

Homeindeksin maksimiarvo riippuu tarkasteltavassa rakenteessa vallitsevasta lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Kuvassa 4.2 on esitetty ne lämpötila- ja kosteusolosuhteet, joiden vallitessa saavutetaan eri luokitustasojen mukaiset homeindeksin maksimiarvot. Tietyillä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoilla homeindeksi ei voi kohota vastaavaa homeindeksin maksimiarvoa korkeammaksi riippumatta siitä, kuinka pitkään nämä olosuhteet vallitsevat rakenteessa (Hukka & Viitanen 1999).



**Kuva 4.2.** Eri luokitustasojen mukaisten homeindeksin maksimiarvojen saavuttamiseksi vaadittavat lämpötila- ja kosteusolosuhteet (Vinha et al., Tutkimusraportti 143).

Tarkastelun alkuhetkellä homeindeksi  $M=0$  ja homekasvun katsotaan alkaneen, kun saavutetaan homeindeksin arvo  $M=1$ . Homeen kasvun alkamiseen kuluva kriittistä aikaa kuvataan regressiomallilla (Hukka & Viitanen 1999)

$$t_m = \exp(-0,68 \ln T - 13,9 \ln RH + 0,14W - 0,33SQ + 66,02) \quad (4.3)$$

missä

|       |    |  |
|-------|----|--|
| $t_m$ | on | homeen kasvun alkamiseen tarvittava aika (vko) |
| $T$   | on | lämpötila (°C)                                 |
| $RH$  | on | suhteellinen kosteus (%RH)                     |
| $W$   | on | puulaji (0=mänty, 1=kuusi)                     |

SQ on pinnan ravinteikkuus (0 = kuivauksen jälkeen sahattu pinta, 1 = alkuperäinen kuivaamosta tullut pinta)

Parannetun homemallin homeindeksiluokitus perustuu tarkasteltavan materiaalin pinnalta tehtäviin visuaalisiin havaintoihin homeen esiintymisestä. Homeindeksi saa arvoja väliltä 0-6 siten, että M=0 merkitsee puhdasta pintaa ja M=6 erittäin runsasta homekasvua. Homeindeksin luokitustasot on esitetty taulukossa 4.2. Homeindeksi ei erottele eri homelajien esiintyvyyttä tarkasteltavassa materiaalissa vaan se kertoo ainoastaan, esiintyykö homekasvustoa ylipäättään materiaalin pinnoilla. Tämän takia indeksin perusteella ei voida päätellä, kuinka myrkyllisiä ja terveydelle haitallisia homeita materiaalissa kasvaa. (Vinha et al. 2013)

**Taulukko 4.2.** Parannetun homemallin homeindeksin luokitustasot (Vinha et al. 2013).

| Homeindeksi M | Havaittu homekasvu  | Huomautuksia  |
|---------------|---|---|
| 0             | Ei kasvua   | Pinta puhdas  |
| 1             | Mikroskoopilla havaittava kasvu   | Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma   |
| 2             | Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu                                   | Homerihmasto peittää 10 % tutkittavasta alasta (mikroskoopilla),<br>Useita rihmastopesäkkeitä muodostunut       |
| 3             | Silmin havaittava kasvu<br>Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu        | Alle 10 % peitto alasta (silmillä)<br>Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)<br>Uusia itiöitä alkaa muodostua |
| 4             | Selvä silmin havaittava kasvu<br>Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu | Yli 10 % peitto alasta (silmillä)<br>Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla)                                    |
| 5             | Runsas silmin havaittava kasvu  | Yli 50 % peitto alasta (silmillä)   |
| 6             | Erittäin runsas kasvu   | Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto   |

Rakennusmateriaalit on VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämässä parannetussa homemallissa luokiteltu homehtumisherkkyytensä perusteella neljään homehtumisherkkyyksiluokkaan taulukon 4.3 mukaisesti. Materiaalin homehtumisherkkyyys otetaan laskennassa huomioon erilaisten kertoimien avulla. Pääosin orgaaniset materiaalit ovat herkemmin homehtuvia kuin epäorgaaniset. Kun homehtumisriskiä arvioidaan kahden materiaalin välisessä rajapinnassa, tulee tarkastelu useimmiten tehdä herkemmin homehtuvan materiaalin mukaan. Poikkeuksen saattavat muodostaa rakenteet, joissa herkempi materiaali sisältää homesuoja-aineita ja rajapinnan materiaalit ovat tiiviissä kontaktissa toisiinsa. Esimerkiksi homesuojattujen puukuitueristeiden tapauksessa rakenteen homehtumisriski on kuitenkin arvioitava herkemmän materiaalin mukaan. Puukuitueristeen ja viereisen materiaalin välinen kontakti ei ole aina täydellinen johtuen rajapintaan jäävistä koloista ja halkeamista, joissa homeen kasvu on mahdollista homesuoja-aineista huolimatta. Puuosia sisältävissä rakenteissa määräävänä materiaalina homeindeksin laskennan kannalta on yleensä puu. (Vinha et al., Tutkimusraportti 143; Vinha et al. 2013)

**Taulukko 4.3.** Rakennusmateriaalien luokittelu parannetun homemallin mukaisiin homehtumisherkkyyssluokkiin (Vinha et al. 2013).

| Homehtumis-herkkyyssluokka  | Rakennusmateriaali  |
|-----------------------------|---|
| Hyvin herkkä<br>HHL1        | karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty   |
| Herkkä<br>HHL2              | höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy   |
| Kohtalaisen kestävä<br>HHL3 | mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni <sup>1</sup> , kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet |
| Kestävä<br>HHL4             | lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit  |

<sup>1</sup> kevytbetoni kuuluu homehtumisominaisuuksiltaan kahteen eri homehtumisherkkyyssluokkaan. Homeen kasvu-nopeus vastaa homehtumisherkkyyssluokkaa HHL2, mutta homeindeksin maksimiarvo jää homehtumisherkkyyssluokan HHL3 tasolle.

Materiaalin homehtumisherkkyyden lisäksi VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämässä parannetussa homemallissa huomioidaan pakkasen ja kuivien ajanjaksojen negatiivinen vaikutus homeen kasvuun. Tätä varten materiaalit on jaoteltu eri homehtumisherkkyyssluokkia vastaaviin homekasvun taantumaluokkiin, jotka ovat voimakas, merkittävä, kohtalainen ja vähäinen taantuma. Alkuperäisessä homemallissa homehtumisherkkyyssluokkaan HHL1 kuuluvaa puumateriaalia vastasi voimakas taantuma, mutta myöhempien koetulosten perusteella homeen kasvun taantuminen puun pinnalla ei näyttäisi olevan niin nopeaa. Tämän vuoksi FRAME-projektissa homehtumisherkkyyssluokkaa HHL1 vastasi merkittävä taantuma, eikä voimakasta taantumaa käytetty millekään materiaalille. (Vinha et al., Tutkimusraportti 143) Taulukossa 4.4 on esitetty eri homehtumisherkkyyssluokkia vastaavat homekasvun taantumaluokat.

**Taulukko 4.4.** Rakennusmateriaalien homehtumisherkkyyssluokkaa tyypillisesti vastaava homekasvun taantumaluokka parannetussa homemallissa (Vinha et al. 2013).

| Homehtumis-herkkyyssluokka  | Homekasvun taantumaluokka    |
|-----------------------------|------------------------------|
| Hyvin herkkä<br>HHL1        | Merkittävä taantuma<br>HTL2  |
| Herkkä<br>HHL2              | Kohtalainen taantuma<br>HTL3 |
| Kohtalaisen kestävä<br>HHL3 | Vähäinen taantuma<br>HTL4    |
| Kestävä<br>HHL4             | Vähäinen taantuma<br>HTL4    |

Tutkittavan materiaalin ollessa homeen kasvun kannalta hetkellisesti liian kuivissa olosuhteissa alkaa homeen kasvu taantua. Taantuminen riippuu tutkittavasta materiaalista taulukossa 4.5 esitettyjen taantumakertoimien mukaisesti ja sitä kuvataan vallitsevan kuivan ajanjakson alkuhetkestä kuluneen ajan funktiona yhtälöllä (Mäkitalo 2012)

$$\frac{dM}{dt} = C_d \cdot \begin{cases} -0,032 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } 0h < t \leq 6h \\ 0, & \text{kun } 6h \leq t \leq 24h \\ -0,016 \cdot \left(\frac{t-t_1}{24}\right), & \text{kun } t > 24h \end{cases} \quad (4.4)$$

missä

|       |    |  |
|-------|----|--|
| t     | on | laskenta-aika alkuhetkestä $t_1$ (h)   |
| $t_1$ | on | alkuhetki (h)  |
| $C_d$ | on | materiaalikohtainen taantumakerroin homeen taantumisnopeudelle taulukon 4.5 mukaan |

**Taulukko 4.5.** Homeen kasvun eri taantumaluokkia vastaavat taantumakertoimet (Vinha et al., Tutkimusraportti 143).

| Taantumaluokka       | Taantumakerroin<br>$C_d$ |
|----------------------|--------------------------|
| voimakas taantuma    | 1,0                      |
| merkittävä taantuma  | 0,50                     |
| kohtalainen taantuma | 0,25                     |
| vähäinen taantuma    | 0,10                     |

Kuten aikaisemmin mainittiin, VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä parannettu home-malli ei kuvaa homehtumisesta aiheutuvaa terveyshaittaa. Vaikka esimerkiksi jonkin kivipohjaisen materiaalin homeindeksi olisi alhaisempi kuin puumateriaalin homeindeksi, voivat kivipohjaisessa materiaalissa elävien homeiden aineenvaihduntatuotteet olla terveydelle haitallisempia kuin puumateriaalissa elävien homeiden. Samalla tavalla homesuoja-aineita sisältävissä materiaaleissa voi esiintyä terveydelle haitallisempia homeita kuin homeelta suojaamattomissa materiaaleissa, vaikka homesuojatulla materiaalilla homeindeksin arvo olisi alhaisempi. (Vinha et al. 2013) Lisäksi tulee huomata, että homemalli perustuu mittaustulosten tai laskennallisen mallinnuksen pohjalta tehtävään arviointiin ja riskitarkasteluun eikä siitä saatavia tuloksia tule tarkastella tarkkoina arvoina. Mallissa homeen kasvun biologista ilmiötä on yksinkertaistettu, joten se ei kuvaa täydellisesti homeen biologista kasvukäyrää, vaan sen avulla voidaan määrittää homeen kasvun riskin mahdollisuutta ja suuruusluokkaa. (Vinha et al., Tutkimusraportti 143)



## 5 RAKENTEIDEN TOIMIVUUDEN KRITEERIT

Rakennusfysikaalinen suunnittelu on olennainen osa koko rakennuksen suunnittelua. Jotta voidaan tehdä päätelmiä jonkin ratkaisun rakennusfysikaalisesta toimivuudesta, on tiedettävä kriteerit, jotka kyseisen ratkaisun tulee täyttää ollakseen toimiva. Luvussa 5.1 perehdytään aluksi siihen, mitä rakennusfysikaalisella suunnittelulla tavoitellaan ja mihin asioihin sillä voidaan vaikuttaa. Sen jälkeen luvussa 5.2 tehdään lyhyehkö katsaus keskeisimpiin Suomessa käytössä oleviin yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä suunnittelua koskeviin määräyksiin ja ohjeisiin. Lopuksi luvussa 5.3 esitellään tässä tutkimuksessa käytettävät rakenteiden toimivuuskriteerit perusteluineen.

### 5.1 Rakennusfysikaalisen suunnittelun tavoitteet

”Rakennus on suunniteltava ja rakennettava kokonaisuutena siten, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto” (RakMk D2 2012). 2000-luvulla käytetyt rakenneratkaisut ovat tuoneet korostuneesti esiin haasteita, jotka liittyvät rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. Tällaisia haasteita ovat energiansäästön ja eristepaksuuksien kasvamisen aiheuttama vaipparakenteiden kosteusteknisten olosuhteiden heikkeneminen, ilmastonmuutoksen seurauksena mahdollisesti yltävä ympäristön kosteusrasitus, uudet rakenteet ja rakennusmateriaalit sekä tiukentuneet rakentamismääräykset. Lisäksi sisäilman laatutasovaatimukset ovat nousseet jatkuvasti. Näihin haasteisiin pyritään vastaamaan rakennusfysiikan suunnittelun keinoin siten, että lopputuloksena olisi määräysten mukainen ja kokonaisuutena toimiva rakennus. Aikaisemminkin rakennusalaan ovat vaivanneet home- ja kosteusongelmat, sillä valtaosa rakennuksissa havaituista vaurioista on liittynyt nimenomaan rakennuksen lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Erityisesti puutteellisesta liitosten ja detaljien suunnittelusta on aiheutunut kosteusvaurioita, jotka voisivat olla vältettävissä rakenteiden yksityiskohtaisemman tarkastelun avulla. Rakenteiden ja taloteknisten järjestelmien monimutkaistuessakin myös erilaisten laskennallisten tarkastelujen tarve kasvaa. Huolellisesta suunnittelusta huolimatta rakenteissa voi esiintyä vikoja, jos suunnitelmien asianmukaisesta toteuttamisesta ei huolehdi. Esimerkiksi ilmavuotojen esiintyminen rakennuksessa riippuu täysin työn laadusta kaikissa ilmatii-  
viyteen vaikuttavissa työvaiheissa. (Vinha 2009; RIL 107-2012; Siikanen 2014)

Rakennusfysiikan suunnittelun avulla vaikutetaan rakennusten ja rakenteiden toiminnan kautta rakennuksen käyttäjien viihtyvyyteen, terveyteen ja hyvinvointiin (Siikanen 2014). Suunnittelussa pyritään huomioimaan myös työtekniset, taloudelliset ja ympäristölliset seikat tilanteen mukaan. Rakennusfysiikan osa-alueisiin luetaan kuuluvaksi

lämmön, kosteuden ja ilman ohella akustiikka ja valaistus, mutta kahta viimeksi mainittua ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä. Seuraavassa esitellään rakennusfysikaalisen suunnittelun tehtävät lämmön, kosteuden ja ilman osa-alueilta lähteen Vinha (2009) mukaan.

Lämpöteknisellä suunnittelulla pienennetään rakennuksen lämpöenergian kulutusta. Samalla ehkäistään materiaalien ja rakenteiden turmeltumista ja parannetaan sisätilojen lämpöviihtyisyyttä. Lämpöteknisessä suunnittelussa voidaan tarkastella sopivan lämmöneristeen valintaa, rakenteeseen syntyvän sisäisen konvektion vaikutuksia, kylmäsiltojen vaikutusta ja ilmavuotoja rakenteen läpi sekä kesäaikaisia huonelämpötiloja. Kosteusteknisen suunnittelun tarkoituksena puolestaan on estää ja rajoittaa ylimääräistä kosteutta tunkeutumasta rakenteisiin. Mikäli kosteuden pääsyä rakenteisiin ei voida täysin estää, on varmistettava rakenteiden riittävä kuivumiskyky ja ehkäistävä rakenteiden ja materiaalien turmeltuminen kosteuden vaikutuksesta. Myös liitosten ja detaljien toimintaan sekä materiaalivalintoihin kiinnitetään huomiota. Näillä toimilla parannetaan sekä rakenteiden toimivuutta että sisätilojen kosteusviihtyisyyttä. Kolmantena rakennusfysiikan suunnittelutehtävänä on parantaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä ja siten ehkäistä ilmavirtausten aiheuttamia haittavaikutuksia rakennuksen sisällä ja vaipparakenteissa. Samalla parannetaan sisäilman laatua, kun vetoisuus ja ulkoilmasta peräisin olevat epäpuhtaudet vähenevät rakennuksen sisätiloissa.

Monin osin lämpö- ja kosteustekninen suunnittelu voidaan tehdä ilman varsinaisia laskentatarkasteluja hyödyntämällä kirjallisuudessa esitettyä tietoa suositeltavista ja vältettävistä ratkaisuista ja huomioimalla edellisessä kappaleessa luetellut periaatteet. Kehittyneillä laskentaohjelmilla voidaan kuitenkin tarkastella monimutkaisempien rakenteiden käyttäytymistä ja eri osatekijöiden vaikutusta rakenteen toimintaan vielä tarkemmin. Rakennusfysiikan näkökulmasta suunnittelussa on päästy tavoitteisiin, kun rakenteet on suunniteltu ja rakennettu siten, että niihin ei aiheudu kosteudesta rakenteellisia, toiminnallisia tai esteettisiä vikoja rakenteen käyttöiän aikana. Rakenteissa oleva kosteus ei saa myöskään aiheuttaa hygienia- tai terveyshaittoja rakennuksen käyttäjille eikä naapureille. Tavoitteiden mukainen rakennus ja sen rakenteet ovat kaikin tavoin terveellisiä, turvallisia ja pitkäikäisiä. (Vinha 2009)

## 5.2 Yläpohjia koskevat määräykset ja ohjeet

Rakentamista koskeva lainsäädäntö sisältyy Suomessa maankäyttö- ja rakennuslakiin ja -asetukseen sekä niihin nojaavaan ympäristöministeriön ylläpitämään rakentamismääräyskokoelmaan. Yksityiskohtaisempia rakennusten ja rakenteiden suunnittelua koskevia ohjeita ja suosituksia on lisäksi esitetty joissakin erillisissä julkaisuissa. Laissa annettu määräykset koskevat paitsi rakennusten käyttöturvallisuuteen, myös niiden terveellisyyteen liittyviä seikkoja. Maankäyttö- ja rakennuslaissa (1999) määrätään rakennusten terveellisyydestä muun muassa seuraavasti (117 §): *Rakennushankkeeseen ryhtyvän on*

*huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan siten, että se on terveellinen ja turvallinen rakennuksen sisäilma-, kosteus- ja lämpöolosuhteet huomioon ottaen. Rakennuksesta ei saa aiheutua terveyden vaarantumista sisäilman epäpuhtauksien tai rakennuksen osien ja rakenteiden kosteuden vuoksi.*

Suomen rakentamismääräyskokoelman osat C2, C4 ja D5 sisältävät määräyksiä ja ohjeita, jotka tulee ottaa huomioon suunniteltaessa ja toteutettaessa rakennusten lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan vaikuttavia osa-alueita. RakMk:n osan C2 (1998) sisältämät ohjeet koskevat kosteudesta johtuvien vaurioiden ja haittojen välttämistä rakentamisessa ja niiden olennainen vaatimus on esitetty seuraavasti: *Rakennus on suunniteltava ja rakennettava siten, ettei siitä aiheudu sen käyttäjille tai naapureille hygieni- tai terveysriskiä kosteuden kertymisestä rakennuksen osiin tai sisäpinnoille. Rakennuksen näiden ominaisuuksien tulee normaalilla kunnossapidolla säilyä koko taloudellisesti kohtuullisen käyttöiän ajan.* Yleisesti kaikkien rakenteiden kosteusteknistä toimintaa koskevissa määräyksissä todetaan, että sisäisistä ja ulkoisista kosteuslähteistä peräisin olevan kosteuden haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin ja rakennuksen sisätiloihin on estettävä ja rakenteen on kyettävä kuivumaan haittaa aiheuttamatta. Pinnoiltaan kastuvien rakenteiden on kestettävä veden vaikutus ja vesi ei saa päästä haitallisesti valumaan rakenteiden sisään tai niiden läpi. Myös tuulen aiheuttama veden ja lumen haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin on estettävä ja rakenteiden läpi sisältä ulospäin tapahtuvan konvektion estämiseksi rakennusvaipan yksityiskohtineen tulee olla riittävän ilmatiivis. Tuulettuvien rakenteiden tuuletusaukot on sijoitettava siten, että rakenteeseen ei jää heikosti tuulettuvia kohtia vaan ilma virtaa kaikkialla tuuletilassa. Vesikaton ja yläpohjan rakenteiden suunnitteluun ja rakentamiseen on annettu myös yleisiä määräyksiä ja ohjeita tarkentavia rakenneosakohtaisia määräyksiä. Määräykset koskevat vedenpoistoa katolta, vesikatteen tiiviyyttä ja kaltevuutta, räystäiden toteuttamista, aluskatteen ja höyrynsulun käyttämistä sekä yläpohjien tuuletusjärjestelyjä.

Rakentamismääräyskokoelman osa C4 (2012) sisältää rakennusten lämmöneristystä koskevat ohjeet. Näiden ohjeiden mukaan yläpohjien lämmöneristekerroksessa ei saa tapahtua haitallisessa määrin luonnollista konvektiota. Jos luonnollista konvektiota tapahtuu sallittua enemmän, se on estettävä rakenteellisin toimenpitein tai vaihtamalla lämmöneriste kokonaan tai osittain vähemmän ilmaa läpäisevään lämmöneristeeseen. Suunnittelun lisäksi eristeiden huolellisella asentamisella on pyrittävä siihen, että lämmöneristekerroksen sisällä ei esiintyisi tarpeettomia ilmavirtauksia. C4 ohjeistaa myös ottamaan rakenteiden liitosten suunnittelussa huomioon kylmäsiltojen vaikutuksen rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan, kiinnittämään erityistä huomiota rakennusvaipan ilmansulun yhtenäisyyteen ja tiiviyyteen ja suojaamaan tarvittaessa lämmöneristekerroksen tuulen aikaansaamilta haitallisilta ilmavirtauksilta erillisellä tuulensuojalla. Lämmöneristystä koskevien ohjeiden tavoitteena on, että rakennuksen sisätiloissa saavutetaan rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaiset lämpöolot kuluttamatta tarpeettomasti energiaa.

Rakennusten sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa koskevat määräykset ja ohjeet on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa D2 (2012). Tässä osiossa määrätään, että *rakennus on suunniteltava ja rakennettava kokonaisuutena siten, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto*. Sisäilmaston terveellisyydestä, turvallisuudesta ja viihtyisyydestä on varmistuttava määräyksen mukaan muun muassa silloin, kun suunnitellaan rakennuksen lämmön- ja kosteudeneristystä ja määritellään rakennuksen ulkovaipan ilmanpitävyyttä. Esimerkiksi epäedullinen ilman liike, lämpösäteily ja pintalämpötilat eivät saa heikentää rakennuksen käyttäjien viihtyvyyttä oleskeluvyöhykkeellä. Toisaalta viihtyisä huonelämpötila tulee saavuttaa hyvällä suunnittelulla ja huolellisella rakentamisella ilman tarpeetonta energiankäyttöä. RakMk D2:n ilmanlaatua koskevassa osassa määrätään, että rakennuksen sisäilmassa ei saa esiintyä liikaa sellaisia kaasuja, hiukkasia, mikrobeja ja hajuja, jotka ovat terveydelle haitallisia tai alentavat tilan viihtyisyyttä. Sisäilman kosteus ei saa olla rakennuksen käyttötarkoituksen kannalta jatkuvasti liian korkea eikä kosteutta saa tiivistyä rakenteisiin tai niiden pinnoille siten, että siitä aiheutuu kosteusvaurioita, mikrobikasvua tai muuta terveydellistä haittaa.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL on julkaissut kirjan *Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet* (RIL 107–2012), joka sisältää rakennusten käytännön kosteusteknisessä suunnittelussa, toteutuksessa, ylläpidossa ja korjauksessa tarvittavia ohjeita ja ratkaisuja. Ohjeiden tavoitteena on, että toteutettavat rakenteet olisivat kosteusteknisesti toimintavarmoja ja rakennukset käyttäjien kannalta terveellisiä. RIL 107:ssä annetaan kosteustekniseen suunnitteluun, rakennusten toteutukseen ja ylläpitoon yleisohjeita sekä yksityiskohtaisia rakennetyyppikohtaisia ohjeita ja ratkaisuja. Yleisohjeiden mukaan rakenteiden kosteusteknisen suunnittelun yhteydessä on otettava huomioon vallitsevat sisä- ja ulkoilman olosuhteet sekä ennustetun ilmastomuutoksen vaikutus rakenteen toimintaan. Kosteusteknisellä suunnittelulla on pyrittävä estämään haitallisen kosteuden kertyminen ja varmistamaan rakenteiden kuivumiskyky ja materiaalien riittävä kosteuden sietokyky. Jo suunnittelun aikana on hyvä huomioida eri rakenneosien käyttöiät ja varautua mahdollisiin poikkeustilanteisiin, kuten vesivahinkoihin. Rakennuksen toteutuksen aikana on puolestaan tärkeää suojata rakennusmateriaalit ja keskeneräiset rakenteet kosteudelta.

Myös RIL 107–2012 ohjeistaa suunnittelemaan rakenteet siten, että estetään sekä veden pääsy rakenteiden sisään että vesihöyryn liiallinen siirtyminen sisätiloista rakenteisiin. Kirjassa on esitetty rakenteiden tiiviyyteen liittyen esimerkiksi höyrynsululle asetetut vaatimukset erityyppisille (avohuokoisille ja umpisoluisille) lämmöneristeille, suosituksia höyrynsulun ja tuulensuojan välisestä vesihöyrynvastussuhteesta sekä höyrynsulun, ilmansulun ja tuulensuojan asennus- ja tiivistysohjeita. Yläpohjien yleiseksi suunnitteluohjeeksi annetaan: *Vesikattorakenteisiin ei saa kerääntyä sisätiloista kosteutta haitallista määrää. Rakenteisiin tiivistyvän kosteuden on päästävä poistumaan rakenteista vaurioita aiheuttamatta*. Kirjassa on esitetty yksityiskohtaisesti vesikate- ja aluskatema-

terიაალებილ ასეტილთ ვატიმუკსეკი ოჟეიტი ერილასენ ოლპოჟარაკენტიდენ თუელუკსენ თოეუტიმასეკსი. მუოლ რაკენტიდენ ოკსიტიოკოტიენ, კუნენ პელიტიენ, ლიპივინტიენ ჯა რაჟსტიდენ სუოსიტელთავა თოეუტიუსაპაა ონ ოჟეისტეტი ვარსინ თარკასტი.

თერვეელისენ ჯა ვიიტიისიენ რაკენნუსენ სუენნიტელუა ოჟაა ედელი მანიტიუენ მარარაჟსენ ჯა ოჟეიდენ ოჟელა სოსიალი- ჯა თერვეისმინისერიონ ჯულკაისემა ასუმისთერვეისოჟე (2003). სე კასიტელე ასუნთენ ჯა მუიდენ ოლსელუტილოენ ფისიკაალისია, კემიალისია ჯა მიკრობიოლოგისია თეკიჟიტი, ჟოკა ვოივთ აიჟეუტიათ თერვეისჟაიტიათ იჟმისილ. თერვეისჟაიტი ონ თასა ჯულკაისუსა მარირელტი ესიმერკისი ასუინჟპარისტონ თეკიჟასტი თაი ოლსუთესთა აიჟეუტივაკსი საირაუდესი თაი თერვეიდენ ჰაირიოკსი. მუოლ ალთისტუმისთა თერვეიდელ ჰაილალისელე აინეელე, კუნენ მიკრობიკასვუსთონ თუოტიამილ ჯიღდისტეილ, პიდეტიათ თერვეისჟაიტიანა. ასუმისთერვეისოჟეესა ონ ესიტეტი ასუნნონ ფისიკაალისილ თეკიჟილ, კუნენ სისაილმან ლაჟპოტილალე ჯა კოსთეუდელ სეკი ილმან ლაადულე, სუოსიტუსია ჯა ოჟეარვოჯა, ჟოკა პერუსთუვთ თერვეისვალვონნასა ვაკიინთუნეესენ კაჟიტიანთონ ჯა ალან კანსაინვალისეენ თუტიკიმუკსენ.

რაკენნუსენ ლაჟპოტეკნისენ თოიმივუდენ ოსალთ ასუმისთერვეისოჟეესა ონ ანნეტი ოჟეარვოჯა ჰუონეილმან, სეინიენ ჯა ლატიოიდენ ლაჟპოტილალე სეკი პისთემაისელე პინთალაჟპოტილალე. ოჟეარვოთ ონ ლუოკიტელთ ჰუვან ჯა ვალტივან თასოონ სიენ, ეტი ჰუვთ თასო ვასთაა პააოსინ სუომენ რაკენთამისმარარაჟსოკოელმან მუკაისია უოდისრაკენთამისელე ასეტიუთა ვაჰიმმაისვატიმუკსია. ვალტივთ თასო ილმოიტიათ ოჟეარვონ, ჟონკა ალითუმისესთა ვოი ჟო აიჟეუთუა თერვეისჟაიტიათ რაკენნუსენ კაჟიტიჟილ. კოსთესთეკნისეენ თოიმივუთეენ ლიტიუვი ოჟეარვოჯა ონ ანნეტი ჰუონეილმან კოსთეუდესთა ჯა თარვითავასთა ილმანვაიღდონ მარარასტი სისატილოისა. ფისიკაალისენ ოლოენ ოჟელა ოჟეარვოჯა ონ ესიტეტი თილოენ თერვეელისიჟეენთ ვაიკუტიავიენ კემიალისენ ეპაჟუთაუკსიენ, ჰიუკკასენ, კუიტიუენ ჯა მიკრობიკასვუსთონ მარარასტი სისაილმასა.

ედელი ესიტელტიუენ ნორმიენ ჯა ოჟეკირჟოენ ავულთ ონ პირიტი ვარმისთამაან, ეტი სუომესა რაკენნეტიავთ ოლპოჟათ ოლისივთ ლაჟპო- ჯა კოსთესთეკნისესთი თურვალისია ჯა თერვეელისია. თასა ჟიჟეიდედსა ონ კასიტელტი რაკენტიდენ ლაჟპო- ჯა კოსთესთეკნისთი სუენნიტელუა კოსევისთა ლეისთ, მარარაჟსისთი, ოჟეისთა ჯა სუოსიტუსიასთა აინოასთაან ჟოიტიკინ თამან თუტიკიმუკსენ კანალთა კესეკისიმი.

### 5.3 ტუტიკიმუკსესა კაჟიტიეტივთ თოიმიტიკრიტერიტი

რაკენტიდენ თოიმიტიკრიტერეიკსი ონ ვალიტივა კრიიტისიმმათ თეკიჟათ, ჟოკა აიჟეუტიავთ იჟმისილ თერვეის- ჯა ვიიტიუვიჟსჟაიტიოჯა ჯა ლისაავთ რაკენთეენ ვაურიოიტიმისრისკია. (ვინჰა 2011) თასა თუტიკიმუკსესა ონ ასეტიუთ რაკენტიდენ ლაჟპო- ჯა კოსთესთეკნისთი თოიმივუთთა კოსევიენ ლასკენნალისენ კრიტერიენ რაჯა-არვოთ სიენ, ეტი ნე სისატივთ ოლიმარარაისთი ვარმუთთა ვერრათუნა ნუკიისენ რაკენთამისთა ოჟააივიენ ნორმიენ მუკაისეენ ვაჰიმმაისთასოონ. თამან თავოიტიეენა ონ პარანთა რაკენტიდენ თოიმიტიათ ჯა სისაილმან ლაადუა. კრიტერიტი ჯა რაჯა-არვოთ ონ მარარატიანტი ტყყყ:ნ რაკენნუსფისიკან ასიანთუნტიჟარიჟმა თამან თუტიკიმუკსეპროჟეკტინ ჟიჟეიდედსა.

Toimintakriteerien määrittämisessä on otettu huomioon muun muassa ennustettu ilmastomuutos, lämmöneristyspaksuuksien kasvaminen, rakenteiden vikasietoisuus, pitkäaikaiskestävyys ja sisäilman olosuhte- ja laatuvaatimukset. Vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toimivuuden laskennallisiksi kriteereiksi valittiin tässä tutkimusprojektissa homeindeksi, kosteuden kondensoituminen, muunnettu Rayleighin luku ja lämpötilaindeksi. Diplomityössä käsitellään kuitenkin näistä ainoastaan kolmea ensimmäistä kriteeriä, joiden täyttyminen voidaan todeta laskennallisesti. Lämpötilaindeksikriteerin täyttymisen varmistamiseksi on tarkasteltava erilaisia yläpohjarakenteiden liitos- ja läpivientidetalleja, mutta tämä tutkimusprojektiin sisältyvä työvaihe on rajattu diplomityön ulkopuolelle. Seuraavassa on esitelty tässä diplomityössä käytettävät kriteerit perusteluineen ja raja-arvoineen sekä menetelmät, joilla kunkin kriteerin täyttyminen tarkistetaan.

### 5.3.1 Homeindeksi

Rakenteiden tulee täyttää seuraava laskennallinen vaatimus: *Rakenteiden sisällä ei esiinny homeen kasvua. Homeindeksin arvon tulee olla alle 1,0 kantavissa rakenteissa ja lämmöneristekerroksessa sekä sen sisäpuolella olevissa materiaalikerroksissa.* Homeen kasvu on valittu toimintakriteeriksi, koska sitä voidaan arvioida laskennallisesti kohtuullisen luotettavasti. Homeindeksin avulla on mahdollista arvioida rakenteen ja sen kautta koko rakennuksen terveellisyyttä. Homeindeksin tasosta voidaan päätellä myös esimerkiksi, onko rakenteessa olevasta kosteudesta vaaraa puun lahoamisen tai rakenteiden lujuuden osalta. Tulevaisuudessa ilmastomuutos lisää homeen kasvulle otollisia olosuhteita, jolloin homeindeksin tarkasteleminen rakenteen toimivuuden osoittamiseksi on entistä perustellumpaa. (Vinha et al. 2013)

Homeindeksiä määritettäessä laskennallisena vertailusuurena käytetään homeen kasvun kannalta kriittisessä kohdassa rakennetta laskettua homeindeksin maksimiarvoa testivuoden aikana. Laskenta tehdään rakenteen sisältä valituista tarkastelupisteistä saatavien lämpötilan ja huokosilman suhteellisen kosteuden avulla. Kantavissa rakenteissa sekä lämmöneristekerroksessa ja sen sisäpuolella olevissa materiaalikerroksissa homeindeksin maksimiarvon ( $M_{\max}$ ) vuoden aikana tulee olla  $< 1,0$ , mikä tarkoittaa, että homeen kasvua ei sallita mainituissa rakennekerroksissa. Lähellä vaipparakenteiden ulkopintaa homeen kasvu sen sijaan joudutaan hyväksymään, koska ulkoilman olosuhteissa homeindeksin maksimiarvo nousee hyvin korkeaksi. (Vinha et al. 2013)

Valitulle homeindeksin maksimiarvolle on useita perusteita. Kantavissa rakenteissa homeen kasvua ei sallita johtuen rakenteiden pitkästä käyttöikätaivoitteesta ja vaurioituneiden rakenteiden uusimisen hankaluudesta. Lämmöneristekerroksessa ja sen sisäpuolella olevissa rakennekerroksissa homeita ja niiden aineenvaihduntatuotteita ei saa esiintyä, koska sieltä niiden siirtyminen sisäilmaan rakenteessa olevien ilmavuotokohtien kautta on huomattavasti helpompaa kuin rakenteen uloimmista kerroksista. Homeindeksin raja-arvon tulee myös olla riittävän alhainen, koska laskennalliset tarkastelut sisältävät

aina epävarmuustekijöitä ja yksinkertaistuksia eikä kaikkia rakenteissa mahdollisesti esiintyviä kosteusvuotoja voida ottaa laskennassa huomioon. Rakenteissa tulee siis olla vikasietoisuutta vuototilanteiden varalle. Lisäksi on huomattava, että rakennusfysikaaliset laskentatarkastelut eivät sisällä varmuuskertoimia samalla tavalla kuin esimerkiksi rakenteiden lujuustarkastelut. (Vinha et al. 2013)

Homeindeksin laskennassa käytetään testivuotia, joiden ilmasto-olosuhteet ovat homeen kasvun kannalta kriittisiä. Tästä huolimatta rakenteiden homehtumisriski voi joinakin vuosina olla vielä suurempi kuin testivuotien olosuhteissa. Lisäksi yksittäisen rakennuksen ympärillä oleva mikroilmasto voi aiheuttaa joihinkin ulkovaipan kohtiin huomattavasti laskentatuloksia suuremman kosteusrasituksen riippuen rakennuksen muodosta ja lähiympäristöstä. Myös näistä syistä valitun homeindeksin raja-arvon tulee olla riittävän alhainen. VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä parannettu homemalli ei erottele eri homelajeja eikä niiden aineenvaihduntatuotteiden toksisuutta toisistaan, eikä siten kuvaa homehtumisen aiheuttamaa terveysriskiä. Kun homeindeksin maksimiarvoksi valitaan 1,0, homeen kasvua ei sallita lainkaan, jolloin vältetään myös eri homelajien haitallisuuden arvioinnista syntyvät ongelmat. (Vinha et al. 2013)

### 5.3.2 Kosteuden kondensoituminen

Rakenteiden tulee täyttää laskennallinen vaatimus: *Rakenteiden sisällä olevien puupohjaisten materiaalien rajapintoihin ei kerry käyttötilanteessa haitallisessa määrin ylimääristä kosteutta (kondensoitunutta tai materiaaleissa kapillaarisella alueella olevaa kosteutta)*. Kosteuden kondensoituminen tarkoittaa vesihöyryn tiivistymistä rakenteen sisällä tai pinnalla vedeksi tai jääksi, kun ilman vesihöyrypitoisuus on saavuttanut kyseisessä kohdassa kyllästyskosteuspitoisuuden ( $\phi = 100\%$  RH) (Vinha et al. 2013) Kapillaarisella alueella oleva kosteus tarkoittaa sitä kosteuden määrää, joka ylittää materiaalin hygroskooppisen kyllästyskosteuspitoisuuden.

Kosteuden kondensoituminen on valittu rakenteiden toimintakriteeriksi, koska se aiheuttaa monia haittoja, kuten paikallisten kosteuskertymien syntymistä rakenteiden alaosiin, puupohjaisten materiaalien lujuuden ja jäykkyyden heikkenemistä, lämmöneristeiden ja tuulensuojalevyjen muodonmuutoksien lisääntymistä (aiheuttaen mm. lisääntyneitä ilmapuotoja rakenteeseen), lämmöneristeiden lämmönjohtavuuden kasvua, metalliosien korroosion lisääntymistä ja naulojen höltymistä puurakenteissa. Mainituista syistä johtuen kosteuden kondensoitumista materiaalien rajapinnoissa on rajoitettava, vaikka laskennassa kosteus pystyisikin kuivumaan pois rakenteesta haittaa aiheuttamatta. Myös kosteuden kondensoitumisen valinta rakenteiden toimintakriteeriksi perustuu siihen, että sitä voidaan arvioida laskennallisesti kohtuullisen luotettavasti. Lisäksi kosteuden kondensoitumiselle otolliset olosuhteet lisääntyvät tulevaisuudessa ilmastomuutoksen seurauksena, jolloin kondensoitumisesta muodostuu vieläkin tärkeämpi kriteeri rakenteen toimivuuden kannalta. (Vinha et al. 2013)

Laskennassa kosteuden kondensoitumisen vertailusuurena käytetään kondensoituneen kosteuden maksimimäärää testivuoden aikana. Se lasketaan rakenteen sisältä valituista tarkastelupisteistä saatavien lämpötilan ja huokosilman suhteellisen kosteuden avulla. (Vinha et al. 2013) Vertailusuureen raja-arvoksi on asetettu  $0 \text{ g/m}^2$ , eli kosteuden kondensoitumista ei sallita rakenteessa lainkaan.

Homeindeksin sallituksi maksimi arvoksi valittiin tässä tutkimuksessa 1,0. Jos kondensoituneen kosteuden maksimimääränä käytettäisiin homehtumisherkkyyssuokkien HHL1 ja HHL2 puupohjaisille materiaaleille aiemmissa tutkimuksissa (Vinha 2007) määritettyä arvoa  $150 \text{ g/m}^2$ , muodostuisi homeindeksin maksimi arvosta FRAME-tutkimuksen (Vinha et al. 2013) mukaan aina mitoittava kriteeri. Tällöin pelkän homeindeksin tarkasteleminen riittäisi kattamaan rakenteen kosteusteknisen toimivuuden. Kun ylimääräisen kosteuden kertymistä rakenteen sisällä olevien puupohjaisten materiaalien rajapintoihin ei sallita lainkaan, kriteeri on tiukkuudeltaan lähellä homeindeksin sallitun maksimi arvon 1,0 määrittämää tasoa.

### 5.3.3 Muunnettu Rayleighin luku

Rakenteiden tulee täyttää laskennallinen vaatimus: *Avohuokoisia lämmöneristeitä sisältävien yläpohjarakenteiden muunnettu Rayleighin luku on enintään 5 standardin SFS-EN ISO 10456 (2008) mukaan laskettuna.* Muunnettu Rayleighin luku ( $Ra_m$ ) on dimensioton luku, joka kuvaa potentiaalia sisäisen konvektion muodostumiselle rakenteessa (Vinha et al. 2013).

Käytettäessä ilmaa läpäiseviä rakennuseristeitä, kuten kevyttä mineraalivillaa tai erilaisia puukuitueristeitä, suuret eristepaksuudet voivat johtaa pakkaskausilla eristeen sisällä tapahtuviin haitallisen suuriin ilmavirtauksiin eli sisäiseen konvektioon, joka voi heikentää yläpohjarakenteen lämmöneristävyyttä ja lisätä kosteuden kondensoitumisriskiä (Vinha et al. 2013). Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan yläpohjien lämmöneristekerroksissa ei saa tapahtua sisäistä konvektiota haitallisessa määrin (RakMk C4 2012). Muunnettu Rayleighin luku on valittu rakenteen toimintakriteeriksi, koska sen sallittua arvoa rajoittamalla hallitaan sisäisen konvektion vaikutusta rakenteen toimintaan. Rakentamismääräyskokoelman mukainen muunnetun Rayleighin luvun raja-arvo yläpohjarakenteelle on 15, kun lämmöneristeen yläpinta on avoin, ja 30, kun lämmöneristeen yläpinnassa on tuulensuoja. Tässä tutkimuksessa raja-arvo on asetettu siten, että avohuokoisia lämmöneristeitä sisältävien yläpohjarakenteiden muunnettu Rayleighin luku saa olla enintään 5. Valittu raja-arvo perustuu FRAME-tutkimuksen tuloksiin, joiden mukaan muunnetun Rayleighin luvun raja-arvon tulisi olla sekä tuulensuojatulla että suojaamattomalla yläpohjarakenteella enintään 5, jotta sisäinen konvektio ei heikentäisi merkittävästi puhalluseristeiden lämmönvastusta (Vinha et al. 2013).



## 6 LASKENNALLINEN TARKASTELU

Tämän tutkimuksen tulokset perustuvat yläpohjarakenteiden laskennalliseen tarkasteluun. Luvussa 6.1 esitellään aluksi lyhyesti menetelmä, jonka periaatteiden mukaisesti laskennalliset tarkastelut tehtiin. Sen jälkeen luvussa 6.2 esitellään laskennassa käytetty tietokoneohjelma ja lopuksi luvuissa 6.3–6.6 kuvataan, miten laskentatarkastelut tässä tutkimuksessa toteutettiin.

### 6.1 Analysointimenetelmä

Tässä tutkimuksessa yläpohjarakenteiden laskennalliset tarkastelut tehtiin TTY:llä kehitetyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän mukaisesti. Analysointimenetelmä pyrkii huomioimaan keskeiset lämmön ja kosteuden siirtymismuodot ja niiden yhteisvaikutukset, rakenteiden vaurioitumismekanismit ja toimintakriteerit, rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet sekä sisä- ja ulkoilman aiheuttamat kosteusrasitukset yhteisvaikutuksineen. Menetelmä on tarkoitettu apuvälineeksi rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arviointiin eri olosuhteissa. (Vinha et al. 2013)

Analysointimenetelmä koostuu kuvan 6.1 mukaisesti kuudesta eri osasta, jotka ovat toimintakriteerit, laskentaohjelmat, materiaaliominaisuudet, sisä- ja ulkoilman olosuhteet ja tarkasteluperiaatteet. Tiivistettynä TTY:n analysointimenetelmässä on kyse rakenteen rakennusfysikaalisen käyttäytymisen tarkastelemisesta laskennallisesti kriittisissä sisä- ja ulkoilman olosuhteissa ja rakenteen toimivuuden arvioimisesta valittujen toimintakriteerien perusteella. Jotta rakenteen toiminnan laskennallinen tarkastelu olisi mahdollista, on valittujen toimintakriteerien oltava sellaiset, että lämpö- ja kosteusolosuhteiden muutosten vaikutukset yksittäiseen kriteeriin voidaan kuvata matemaattisten kaavojen avulla. (Vinha et al. 2013) Tässä tutkimuksessa käytettävät toimintakriteerit on esitelty edellä luvussa 5.3.



**Kuva 6.1.** Rakenteen kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän rakenne ja osat (Vinha et al. 2013).

Analysointimenetelmän tarkasteluperiaatteiden mukaan sisä- ja ulkoilman olosuhteina on käytettävä sellaisia olosuhteita, jotka tuottavat rakenteeseen kriittiset eli mitoittavat olosuhteet tutkittavan toimintakriteerin kannalta. FRAME-tutkimuksen yhteydessä on määritetty eri vaipparakenteille käytettävät ulkoilman olosuhteita kuvaavat testivuodet Suomen nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Sisäilman mitoittavat lämpö- ja kosteusolosuhteet on esitetty uusimmassa RIL 107:ssä (2012) ja ne perustuvat suomalaisissa asuinrakennuksissa mitattuihin arvoihin. Analyysissa tarvittavia materiaaliominaisuuksia on saatavilla kirjallisuudesta ja laskentaohjelmien tietokannoista, mutta ensisijaisesti on kuitenkin pyrittävä käyttämään aina TTY:llä määritettyjä suomalaisten rakennusmateriaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia. Käytettävissä laskentaohjelmissa tulee olla mukana kaikki keskeiset lämmön ja kosteuden siirtymismuodot sekä olosuhdetekijät. Laskentaohjelmien käyttäytyminen on lisäksi tunnettava tarkasti, jotta tuloksia voidaan pitää riittävän luotettavina. Rakenteen toimintaa tulee lopulta tarkastella tutkittavien toimintakriteerien kannalta kriittisimmissä kohdissa rakennetta, minkä vuoksi tarkastelupisteet sijoitetaan rakenteessa tavallisesti materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin. (Vinha et al. 2013)

TTY:n analysointimenetelmä on tällä hetkellä kehittynein käytössä oleva laskentamenetelmä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan arviointiin. Vaikka tätä menetelmää on edelleen tarpeen kehittää ja siten parantaa myös tulosten tarkkuutta, voidaan menetelmän avulla saada jo nyt entistä yksityiskohtaisemmin tietoa siitä, millä tavalla ja kuinka paljon eri osatekijät vaikuttavat erilaisten rakenteiden kosteustekniseen toimintaan. (Vinha et al. 2013)

## 6.2 Laskentaohjelma

Yläpohjarakenteiden laskennallinen mallintaminen tehtiin tässä tutkimuksessa Delphin-ohjelmalla (versio 5.8.1). Delphin on epästationäärinen numeerinen simulointiohjelma, joka on tarkoitettu yhdistetyn lämmön- ja kosteudensiirron mallintamiseen huokoisissa rakennusmateriaaleissa. Epästationäärisyydellä tarkoitetaan, että rakenteen lämpötila- ja kosteusolosuhteiden laskenta voidaan tehdä ajan suhteen muuttuvissa olosuhteissa. Delphin soveltuu myös rakennekerroksen läpi tapahtuvan konvektion ja mahdollisten rakenteessa olevien tuuletusvälien toiminnan tarkasteluun. (Vinha et al. 2013; Bauklimatik Dresden 2014) Tässä tutkimuksessa laskentatarkastelut suoritettiin Delphin-ohjelmalla, koska se mahdollistaa materiaalikerrosten läpi tapahtuvien ilmavuotojen tarkastelemisen. Muilta osin laskenta olisi voitu tehdä myös esimerkiksi WUFI 2D-ohjelmalla.

Delphinissä tarkasteltava rakenne voidaan mallintaa tarpeen mukaan joko 1-ulotteisena (1D) tai 2-ulotteisena (2D). Tällöin lämmön ja kosteuden siirtyminen tapahtuu laskennassa vastaavasti joko ainoastaan kohtisuorassa suunnassa rakenteen läpi tai sen lisäksi myös materiaalikerrosten suunnassa. 2D-laskentamallia tarvitaan, kun rakenne sisältää epähomogeenisia materiaalikerroksia kuten esimerkiksi lämmöneristekerroksen, jonka sisällä on kantavia puurakenteita. Laskenta tapahtuu jakamalla tutkittava rakenne pieniin elementteihin. Jokaisen elementin alueella vallitsevat vakio-olosuhteet siten, että lämpötila- ja kosteusolosuhteiden muuttuminen on mahdollista vain elementtien välisten rajapintojen kohdalla. 2D-malleille tyypillinen suuri elementtien määrä tuottaa yksityiskohtaisempia laskentatuloksia mutta tavallisesti myös pidentää laskenta-aikaa.

Delphiniä käytettäessä on mahdollista huomioida kaikki lämmönsiirtymismuodot: johtuminen, konvektio ja säteily. Säteilylajeista voidaan sisällyttää laskentaan suora ja diffuusi auringonsäteily sekä pitkäaaltoinen säteily. Kosteudensiirtomuodoista ohjelma osaa huomioida diffuusion, konvektion ja kapillaarisen kosteuden siirtymisen mutta ei painovoimaista siirtymistä. Ohjelman kapillaarisen kosteuden siirtymisen malli ei vastaa täysin todellisuutta, sillä ohjelmassa kapillaarisissa materiaaleissa kosteutta siirtyy todellisuudesta poiketen kapillaarisesti myös lämpötilan ollessa alle 0 °C eikä vesi jäädy lainkaan. Veden painovoimaista siirtymistä Delphinillä ei voida tarkastella, koska ohjelmassa vesi esiintyy ainoastaan sitoutuneena materiaaleihin. Kosteutta ei siis voi tiivistyä materiaalien pinnoille eikä valua tai tippua pinnalta toiselle painovoiman vaikutuksesta. (Vinha et al. 2013)

Kaikki rakenteen lämpö- ja kosteusolosuhteiden kannalta olennaiset, ajan funktiona muuttuvat sisä- ja ulkoilman olosuhdetekijät on mahdollista ottaa huomioon Delphinillä tehtävässä laskennassa. Tällaisia olosuhdetekijöitä ovat lämpötila, suhteellinen kosteus, sade, tuulen nopeus ja suunta, lyhytaaltoinen auringon säteily ja pitkäaaltoinen säteily.

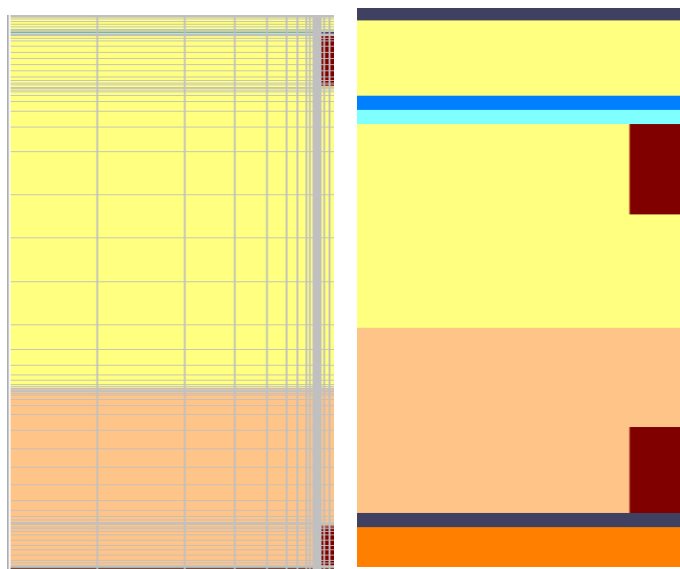
Materiaaliominaisuudet voidaan syöttää ohjelmaan lämpötilan ja/tai suhteellisen kosteuden funktiona, mikä parantaa tulosten tarkkuutta.

### 6.3 Rakenteiden mallintamisen periaate

Tarkasteltavat rakenteet mallinnettiin Delphin 5.8.1 -ohjelmalla niiden homehtumisriskin ja kosteuden kondensoitumisen tutkimista varten. Kuvassa 6.2 on esimerkki Delphinillä 2-ulotteisena mallinnetusta yläpohjarakenteesta. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyvät ainoastaan mallinnetut materiaalikerrokset ja vasemmanpuoleisessa lisäksi saman rakenteen jako elementteihin. Delphin-ohjelmassa on kuvan 6.2 osoittamalla tavalla kaksi vaihtoehtoa rakennemallin kuvan näyttämiseksi:

- kuva, jossa kaikki laskentaelementit näkyvät oikeissa mittasuhteissa ja rakennekerrokset siten oikean muotoisina
- kuva, jossa kaikki laskentaelementit näkyvät keskenään samankokoisina vaikka ovatkin oikeasti keskenään erikokoisia, jolloin eri rakennekerroksia kuvaavien alueiden muoto ja mittasuhteet vääristyvät.

Luvussa 7.1 esitetään kaikista tarkastelluista yläpohjarakenteista vaihtoehdon b) mukaiset mallinnuskuvat, koska niissä ohuet materiaalikerrokset, kuten höyrynsulku ja aluskaite, näkyvät paljon selkeämmin kuin vaihtoehdossa a). Luvussa 7.1 on selvennyksenä jokaisen rakenteen kohdalla mainittu, että kuvat eivät ole mittakaavassa. Kuvassa 6.2 vasemmanpuoleinen rakenne on oikeassa mittakaavassa.



**Kuva 6.2.** Delphinillä tehty 2D-malli yläpohjarakenteesta.

Rakennemallit katkaistiin leveyssuunnassa rakenteen symmetrialinjoilta, jolloin mallien leveydeksi muodostui puolet kattokannattajien k-jaosta (yleensä 450 mm) ja kattokannattajista mallinnettiin vain leveyden puolikas (yleensä 25 mm). Mallien syvyysmitta oli 1000 mm. Laskentamalleja yksinkertaistettiin jättämällä pois esimerkiksi vesikaton ruo-  
teet ja korotusrimat, kattoristikon pysty- ja vinosauvat sekä sisäkaton koolaus, koska

Delphin-ohjelmassa rakennetta ei ole mahdollista mallintaa kolmiulotteisena. Laskentamallien elementtien määrä valittiin sellaiseksi, että laskenta-aika pysyi kohtuullisen pituisena. Elementtejä oli rakenteesta riippuen yhteensä noin 2000–3000 kappaletta. Elementtijako oli kuvan 6.2 osoittamalla tavalla tiheämpi materiaalikerrosten rajapintojen kohdalla, missä tapahtuvat jyrkimmät muutokset lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoissa.

Laskenta tehtiin kahden vuoden mittaiselle ajanjaksolle tammikuun alusta alkaen. Rakenteiden toimintaa arvioitiin jälkimmäisen vuoden ajalta tarkastelupisteistä tunnin välein talteen otettujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvojen perusteella. Käytetyt tarkastelupisteet on esitetty myöhemmin kunkin tarkastellun rakenteen laskentatulosten yhteydessä.

## 6.4 Materiaaliominaisuudet

Tärkeimmät materiaaliominaisuudet rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta ovat lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti, ilmanläpäisevyys, vesihöyrynläpäisevyys, kosteusdiffusiviteetti, tasapainokosteus ja pinnan emissiviteetti/absorptiokerroin. Materiaaliominaisuudet eivät ole vakioita vaan ne riippuvat muun muassa materiaalin tiheydestä, lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta, joten ne tulee syöttää laskentaohjelmaan lämpötilan tai suhteellisen kosteuden funktiona mikäli mahdollista. (Vinha et al. 2013)

Tässä tutkimuksessa käytettiin ensisijaisesti TTY:llä määritettyjä suomalaisten rakennusmateriaalien ominaisuuksia, joita täydennettiin tarvittavilta osin kirjallisuudesta ja laskentaohjelman tietokannasta saaduilla tiedoilla. Laskentatarkasteluissa käytettyjen materiaalien rakennusfysikaalisia ominaisuuksia on esitetty taulukoituna liitteissä 2 ja 3.

## 6.5 Olosuhteet

Laskentamallissa ulkoilman olosuhteina käytettiin FRAME-projektin yhteydessä määritettyjä rakennusfysikaalisia testivuotia. Testivuodet on määritetty kuvaamaan nykyilmaston sekä vuosien 2050 ja 2100 ulkoilman olosuhteita ja kutakin vuotta varten on olemassa kaksi erilaista testivuotta: Jokioisen ja Vantaan testivuodet. Tässä tutkimuksessa käytettiin Jokioisen testivuotia, sillä niiden on todettu olevan mitoittavia vaipparakenteille, joiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman kosteusolosuhteista pääasiassa suhteellinen kosteus. (Vinha et al. 2013) Kaikissa tarkasteluissa yläpohjarakenteissa on vesikate, minkä takia sade ei vaikuta suoraan rakenteen sisäosan kosteustekniseen toimintaan. Ulko-olosuhteista huomioitiin laskentamalleissa tunnin välein muuttuva ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, pystysade, tuulen suunta ja nopeus, suora ja diffuusi auringonsäteily sekä pitkäaaltoinen säteily. Ulkoilman testivuotien säädädata on saatavissa Ilmatieteen laitoksen (2014b) internetsivuilta.

Sisäilman osalta laskennassa otettiin huomioon rakennusfysikaalisten tarkastelujen kannalta keskeisimmät olosuhteet: ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Lämpötilan oletettiin olevan ympäri vuoden 20 °C mutta suhteellisen kosteuden muuttuminen vallitsevan ulkoilman kosteuden mukaan otettiin huomioon. Laskennan alkuhetkellä, ensimmäisen vuoden alussa, kaikkialla rakenteessa vallitsi 20 °C:n lämpötila ja 80 %:n suhteellinen kosteus. Alkuolosuhteiden tasoittuminen testivuoden alun olosuhteita vastaviksi saatiin aikaan laskemalla rakenteen toiminta kahden vuoden pituisella ajanjaksolla ja tarkastelemalla ainoastaan jälkimmäisen testivuoden tuloksia.

Yläpohjarakenteiden tuuletustilan ilmanvaihto otettiin myös huomioon mallinnuksessa. Harjakatoilla tuuletustilan ilmanvaihtuvuutena käytettiin arvoa 0,5 1/h ja tasakatoilla 0,2 1/h. Harjakatoilla vesikatteen ja aluskatteen välisen tuuletusraon ilmanvaihtuvuudeksi arvioitiin 20 1/h. Tuuletustilaan tulevan ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vastasivat kullakin hetkellä ulkoilmassa vallitsevaa lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Harjakattojen ilmanvaihtokerroin perustuu FRAME-tutkimuksen tuloksiin, joiden mukaan optimaalinen ilmanvaihtuvuus tuulettuvalle yläpohjalle on 0,5-1,0 1/h, jos rakenteessa ei ole merkittäviä ilmavuotoja ilman- ja höyrynsulun läpi (Vinha et al. 2013). Tasakattojen oikeaa ilmanvaihtuvuutta ei ole tutkittu, mutta on oletettavaa, että ilman virratessa vaakasuunnassa pitkiä matkoja luonnollinen ilmanvaihtuvuus on joka tapauksessa pienempi kuin harjakatoilla. Harjakattojen korkeammassa tuuletustilassa ilmavirtausta tehostaa lämpötilaeroista aiheutuva noste.

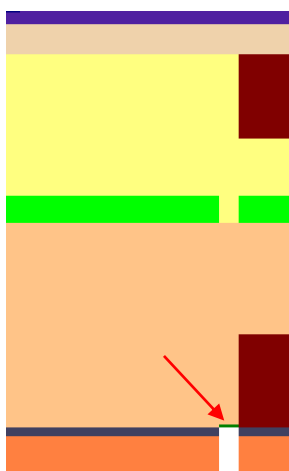
Todellisuudessa yläpohjan tuuletusvälin ylä- ja alapinnan välillä esiintyy lämpötilaerojen aiheuttamaa pitkäaaltoista lämpösäteilyä. Tätä säteilyä ei huomioitu laskentatarkasteluissa, koska testilaskentojen perusteella sillä ei ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Sen sijaan tämän säteilyn sisällyttäminen laskentamalleihin olisi pidentänyt laskenta-aikoja, jotka olivat muutenkin varsin pitkiä. Tuuletusvälin pintojen välisen säteilyn merkityksettömyys selittyy sillä, että pintojen välinen lämpötilaero on pieni lämmöneristekerroksen lämmönvastuksen ollessa suuri ja ilmanvaihdon tasoittaessa lämpötilaeroja tuuletusvälissä.

## 6.6 Ilma- ja sadevuotojen mallintaminen

Rakenteiden toiminta muuttuu, jos niihin ilmaantuu ei-toivottuja ilma- ja kosteusvuotoja. Rakenteiden vikasietoisuuden selvittämiseksi tutkimuksen kohteena olleita yläpohjarakenteita tarkasteltiin myös siten, että niihin kohdistui ilmavuoto sisätilasta tai sadevuoto ulkoilmasta.

Niihin rakenteisiin, joiden lämmöneristemateriaalina oli ilmaa läpäisevä puukuutueriste, mallinnettiin ilmavuoto sisätilasta eristekerroksen läpi tuuletustilaan. Umpisoluisella ja ilmaa läpäisemättömällä polyuretaanieristeellä eristettyjen rakenteiden tapauksessa tällaisen ilmavuodon tarkasteleminen ei sen sijaan ollut mielekäästä, sillä niissä ilmavuodon

tapahtuminen vaatisi yhtenäisen raon koko eristekerroksen läpi. Tällaisen raon esiintymistä todellisessa rakenteessa voidaan pitää epätodennäköisenä, kun lämmöneristekerros toteutetaan useammasta levykerroksesta saumakohdat limittäen ja saumat vaahdottaen. Ilmavuoto mallinnettiin kuvan 6.3 mukaisesti jättämällä kipsilevyyn, höyrynsulkuun ja mahdolliseen tuulensuojalevyyn 1 mm:n levyinen rako kattokannattajan viereen. Lämmöneristekerroksen alareunaan mallinnettiin 5 Pa:n ylipaine tuuletustilaan nähden.



**Kuva 6.3.** Delphinillä mallinnettu yläpohjarakenne, jossa esiintyy ilmavuoto sisätilasta tuuletustilaan. Nuolella osoitetussa elementissä alapaarteen vieressä vaikuttaa 5 Pa:n ylipaine tuuletustilaan nähden.

Ulkoilmasta rakenteen sisään tulevan sadevuodon määränä käytettiin 1 %:a koko pystysateen määrästä. Sadevuoto mallinnettiin jakamalla tämä vesimäärä tasaisesti koko laskentamallin tuuletustilan ilmatilavuuteen. Tämä mallinnustapa ei kuvaa täydellisesti todennukaista sadevuotoa vesikatteen läpi. Todellisuudessa vesi valuisi katteen läpi yksittäisestä kohdasta, leviäisi, tippuisi ja imeytyisi laajemmalle pinnalle rakenteen sisällä ja haihtuisi lopulta tuuletustilan ilmaan. Laskentaohjelmaan tällaista veden valumista ja tippumista ei ole mahdollista mallintaa, joten valittu mallinnustapa kuvaa parhaiten rakenteeseen pääsevän ylimääräisen kosteuden vaikutusta rakenteen toimintaan. Lisäksi siinä kohdassa, josta vuotovesi todellisuudessa pääsee rakenteen sisään, materiaalit kastuvat joka tapauksessa. Siten yksittäistä vuotokohtaa mielenkiintoisempaa on tarkastella sitä, miten ylimääräinen kosteus vaikuttaa rakenteen toimintaan kauempana vuotokohdasta.

## 7 LASKENNAN TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen laskennalliset tulokset. Luku 7.1 sisältää kaikkien tutkittujen rakenteiden homeindeksien ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot. Luvuissa 7.2 ja 7.3 käsitellään tarkemmin kahta laskentatuloksiin olennaisesti vaikuttavaa tekijää: rakenteen ilmanvaihtuvuutta ja hygroskooppisen materiaalin määrää. Luvussa 7.4 esitetään laskentatulokset muunnetun Rayleighin luvun osalta. Luvussa 7.5 vertaillaan eri laskentatapausten tuloksia toisiinsa ja FRAME-tutkimuksen tuloksiin. Lopuksi luvun 7.6 virhearviossa otetaan kantaa tulosten luotettavuuteen.

### 7.1 Homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen

Seuraavissa alaluvuissa esitellään yksitellen jokainen tutkittu rakenne ja sen laskennallisen mallinnuksen tuloksena saadut homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen riskit. Aluksi esitetään alkuperäisten rakenteiden tulokset ja lopuksi korjattujen rakenteiden tulokset niiden rakenteiden osalta, jotka eivät alkuperäisessä muodossaan täyttäneet asetettuja toimintakriteereitä. Kunkin alkuperäistä rakennetta käsittelevän alaluvun sisällä esitellään tulokset vuotamattomalle rakenteelle nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa ja lisäksi vuotavalle rakenteelle nykyilmastossa. Tavanomaisesta tasakatosta ja viherkatosta tulokset on esitetty vertailun vuoksi sekä puukuitueristeellä että polyuretaanieristeellä toteutetulle rakenteelle. Kaikkien alkuperäisten rakenteiden rakennekuvat on esitetty liitteessä 1.

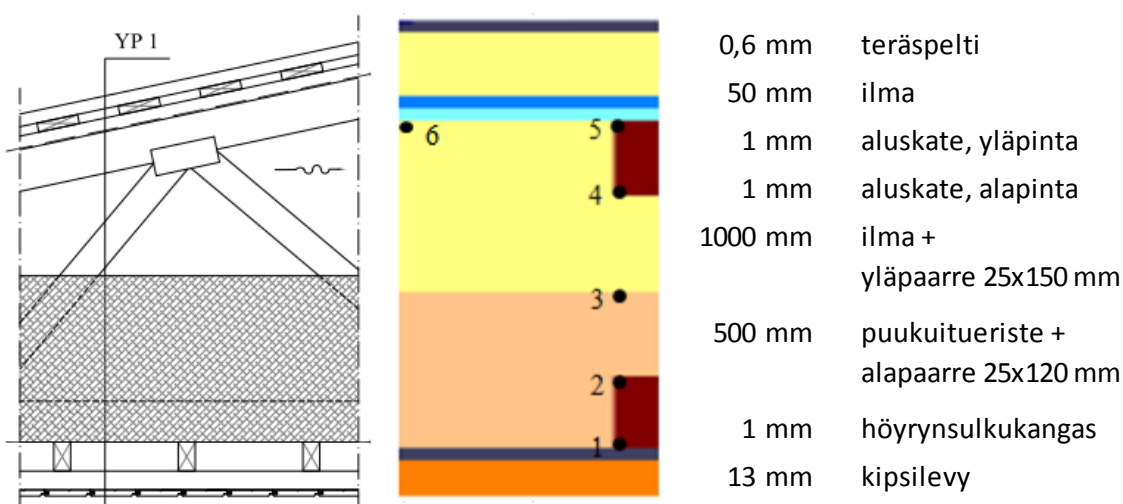
Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista tarkasteltiin harjakattorakenteilla aluskatteen ja höyrynsulkukerroksen välisellä alueella. Rakennuksen sisätilan ja höyrynsulun välisellä alueella suhteellinen kosteus on tavanomaisessa asuinrakennuksessa jatkuvasti niin alhainen, ettei tämän alueen tarkastelu ollut mielekäs asetettujen toimintakriteerien kannalta. Toisaalta vesikatteen ja aluskatteen välinen alue sijaitsee kantavien rakenteiden ulkopuolella, minkä takia alueen kosteusolosuhteilla ei ole yhtä suurta merkitystä rakenteen toimivuuden kannalta kuin rakenteen sisäosien olosuhteilla. Aluskatteen ja höyrynsulun välisellä alueella rakenteissa esiintyvistä materiaaleista herkimmin homehtuva on puu, joten homehtumistarkastelut tehtiin homehtumisherkkyysluokassa HHL1. Poikkeuksena tästä oli aluskatteen pinnassa kattoristikoiden k-jaon puolivälissä sijaitseva tarkastelupiste, johon sovellettiin aluskatteen mukaista homehtumisherkkyysluokkaa HHL3. Tasakatoilla tarkasteltava alue rajautui vastaavasti höyrynsulkukerroksen ja vesikattovanerin välille ja homehtumistarkastelut tehtiin edelleen homehtumisherkkyysluokassa HHL1 lukuun ottamatta ristikoiden k-jaon keskellä vanerin



alapinnassa ollutta tarkastelupistettä, jonka homehtumisherkkyyssuokaksi määrytyi HHL2.

### 7.1.1 Harjakattorakenne YP1

Harjakattorakenne YP1 on tavanomainen tuulettuva yläpohja, jossa on peltikate, aluskate, korkea tuuletustila, puiset kattoristikot, 500 mm:n kerros puukuitueristettä, höyrynsulkukerros ja sisäverhousmateriaalina kipsilevy. Aluskate on kondenssisuojattu muovipohjainen kalvo, jonka alapinta pystyy sitomaan tuuletustilan ilmasta kosteutta  $74 \text{ g/m}^2$  (RT 37917 2010). Höyrynsulkuna rakenteessa on hygrokalvo, jonka diffuusiovastus muuttuu ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden funktiona (RT 38313 2012). Kuvassa 7.1 on esitetty tuulettuvan harjakattoyläpohjan YP1 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.1.** Harjakaton YP1 alkuperäinen rakennekuva sekä laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Mallinnuksen yhteydessä alkuperäistä rakennetta yksinkertaistettiin luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Tarkastelupisteet 1-6 sijaitsevat kuvan 7.1 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien alapaarteen alanurkassa, alapaarteen ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, yläpaarteen alanurkassa, yläpaarteen ylänurkassa ja aluskatteen alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.1 on esitetty rakenteen YP1 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella.

**Taulukko 7.1.** Rakenteen YP1 homeindeksin maksimi-arvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{\max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 | Jokioinen 2050 |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 54.7            | 0              | 59.8            |
| 2                    | 0              | 53.9            | 0              | 57.9            |
| 3                    | 0.092          | 98.5            | 0.504          | 98.5            |
| 4                    | 0.016          | 94.2            | 0.087          | 94.9            |
| 5                    | 0.016          | 92.4            | 0.062          | 93.5            |
| 6                    | 0.002          | 96.4            | 0.010          | 96.7            |

Taulukosta 7.1 nähdään, että homeindeksin maksimi-arvo ei ylitä asetettua raja-arvoa 1,0 missään tarkastelupisteessä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Sen sijaan suhteellinen kosteus lämmöneristeen yläpinnassa ylittää raja-arvon 98 % RH sekä vuoden 2004 että 2050 ilmastossa. Suhteellinen kosteus on yli 98 % RH yhtäjaksoisesti noin kahden kuukauden ajan tammi-helmikuussa. Ylimääräinen kosteus voi kuitenkin sitoutua lämmöneristeenä käytettävään puukuitueristeseen, joten siitä ei todennäköisesti ole haittaa rakenteen toiminnalle. Taulukosta nähdään myös, että rakenteen toiminnan kannalta vuoden 2050 olosuhteet ovat kriittisemmät kuin vuoden 2004 olosuhteet. Sekä homeindeksin että suhteellisen kosteuden maksimi-arvot kasvavat ilmastomuutoksen seurauksena kaikissa tarkastelupisteissä.

Harjakattorakennetta YP1 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisääviä vuotoja luvun 6.6 mukaisesti. Taulukossa 7.2 on esitetty rakenteen homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sadevuodon ja ilmavuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelut tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

**Taulukko 7.2.** Rakenteen YP1 homeindeksin maksimi-arvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{\max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sade- tai ilmavuoto.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 |                |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                      | sadevuoto      |                 | ilmavuoto      |                 |
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 67.0            | 0.006          | 83.6            |
| 2                    | 0              | 67.4            | 0              | 59.5            |
| 3                    | 5.662          | 99.3            | 0.366          | 98.7            |
| 4                    | 5.511          | 99.2            | 0.031          | 94.6            |
| 5                    | 4.988          | 98.6            | 0.031          | 92.9            |
| 6                    | 0.389          | 100.0           | 0.003          | 96.8            |

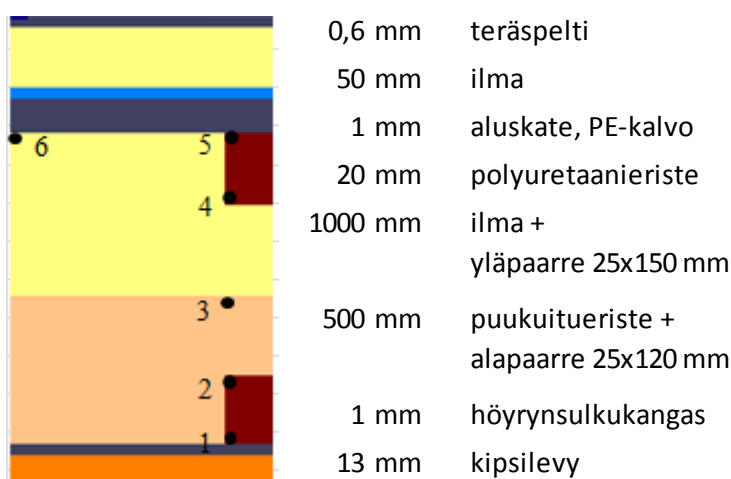
Taulukosta 7.2 nähdään, että rakenteessa, jossa esiintyy ilmavuoto, homeindeksin maksimi-arvo ei ylitä asetettua kriteeriä  $M_{\max} \leq 1,0$ . Sen sijaan suhteellisen kosteuden maksimi-arvo ylittää kriteerin  $RH_{\max} < 98$  % lämmöneristeen yläpinnassa. Suhteellinen kosteus on tässä pisteessä yli 98 % RH noin 4 kuukauden ajan joulukuun alusta maaliskuun

lopulle saakka. Tässäkään tapauksessa ylimääräisestä kosteudesta ei kuitenkaan todennäköisesti aiheudu merkittävää haittaa rakenteen toiminnalle johtuen puukuitueristeen kosteudensitomiskyvystä. Vertaamalla keskenään vuotamatonta ja vuotavaa rakennetta (taulukot 7.1 ja 7.2) havaitaan, että rakenteessa esiintyvä ilmavuoto kasvattaa homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvoja kaikissa tarkastelupisteissä. Suhteellisen kosteuden kasvu on merkittävintä tarkastelupisteessä 1, joka sijaitsee lähellä rakenteen sisäpintaa.

Sadevuodon tapauksessa homeindeksin sallittu maksimiarvo ylittyy ja homekasvustoa esiintyy lämmöneristeen yläpinnan ja aluskatteen välisellä alueella. Tarkastelupisteissä 3-5 homeindeksi saavuttaa korkeimmillaan lähes arvon  $M_{\max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimiarvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus on yli 98 % RH yhtäjaksoisesti noin 5-6 kuukauden ajan tarkastelupisteissä 3-6. Vertaamalla taulukossa 7.1 esitettyjä vuotamatoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.2 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että harjakattorarakenteen YP1 kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteeseen pääsee ylimääräistä kosteutta. Sadevuoto lisää homeen kasvua rakenteessa vielä enemmän kuin ilmavuoto ja rakennekerrokset pysyvät jatkuvasti hyvin kosteina. Ilmavuoto kasvattaa erityisesti rakenteen alaosan suhteellista kosteutta kun taas sadevuoto vaikuttaa eniten rakenteen yläosan kosteusolosuhteisiin.

### 7.1.2 Korjattu harjakattorakenne YP1\_K

Edellisessä luvussa 7.1.1 todettiin, että alkuperäinen harjakattorakenne YP1 ei sellaisenaan täytä kosteuden kondensoitumiselle asetettua kriteeriä, vaikka siitä ei todennäköisesti aiheudu haittaa rakenteen toiminnalle. Rakennetta parannettiin lisäämällä aluskatteen ja ristikoiden yläpaarteiden väliin lämmöneristeeksi 20 mm polyuretaanilevy. Polyuretaanilevyn pinnat ovat diffuusiotiiviit. Aluskatteena on tavanomainen PE-kalvo, jonka materiaaliominaisuudet vastaavat liitteessä 2 esitetyn kondenssisuojatun aluskatteen yläpinnan ominaisuuksia. Kuvassa 7.2 on esitetty korjatun rakenteen YP1\_K laskeentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuva ei ole mittakaavassa.



**Kuva 7.2.** Korjatun harjakaton YP1\_K laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Tarkastelupisteet 1-6 sijaitsevat kuvan 7.2 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien alapaarteiden alanurkassa, alapaarteiden ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, yläpaarteiden alanurkassa, yläpaarteiden ylänurkassa ja lisälämmöneristeen alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.3 on esitetty rakenteen YP1\_K homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

**Taulukko 7.3.** Rakenteen YP1\_K homeindeksin maksimi-arvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

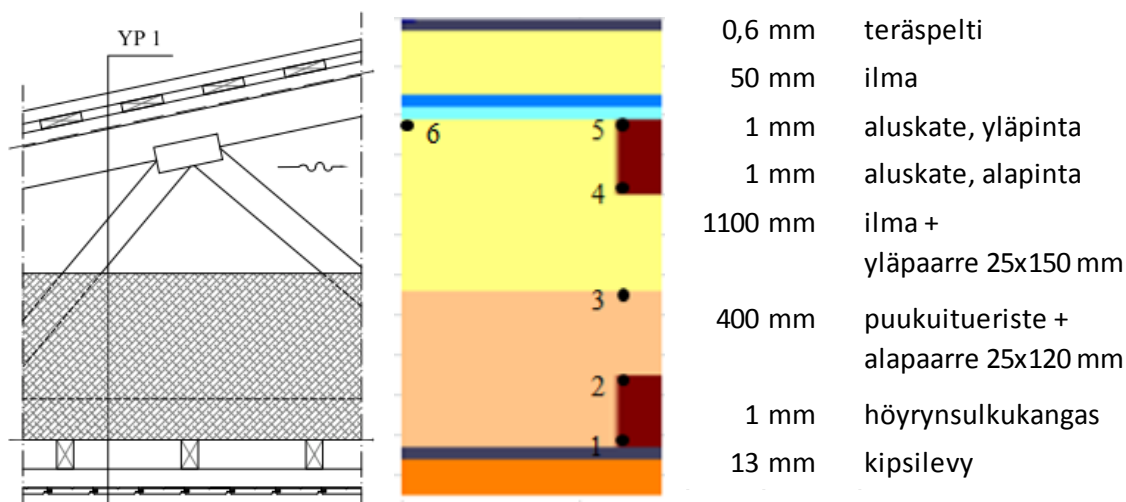
| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 53.5           | 0              | 58.8           |
| 2                    | 0              | 52.8           | 0              | 57.2           |
| 3                    | 0.042          | 96.4           | 0.221          | 96.3           |
| 4                    | 0.007          | 91.0           | 0.061          | 91.7           |
| 5                    | 0.004          | 89.9           | 0.044          | 90.8           |
| 6                    | 0.001          | 93.3           | 0.006          | 93.9           |

Taulukosta 7.3 nähdään, että 20 mm polyuretaanilevyn lisääminen kattoristikoiden yläpuolelle paransi rakenteen toimintaa siten, että rakenne täyttää myös kosteuden kondensoitumiselle asetetun kriteerin  $RH_{max} < 98$  %. Korjattu rakenne on siis paremmin toimiva myös asetettujen kriteerien osalta. Vertaamalla taulukoita 7.1 ja 7.3 keskenään havaitaan, että aluskatteen yhteyteen lisätty lämmöneriste pienentää homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvoja kaikissa tarkastelupisteissä.

### 7.1.3 Harjakattorakenne YP2

Harjakattorakenne YP2 on samanlainen rakenne kuin edellä esitetty YP1, mutta sen lämmöneristepaksuus on 400 mm. Tällöin tuuletustilan korkeus on vastaavasti 100 mm suurempi kuin rakenteella YP1, eli 1100 mm. Kuvassa 7.3 on esitetty harjakattoyläpoh-

jan YP2 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.3.** Harjakaton YP2 alkuperäinen rakennekuva sekä laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Tarkastelupisteet 1-6 sijaitsevat kuvan 7.3 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien alapaarten alanurkassa, alapaarten ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, yläpaarten alanurkassa, yläpaarten ylänurkassa ja aluskatteen alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.4 on esitetty rakenteen YP2 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella.

**Taulukko 7.4.** Rakenteen YP2 homeindeksin maksimiarvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 56.9           | 0              | 61.8           |
| 2                    | 0              | 56.8           | 0              | 60.5           |
| 3                    | 0.166          | 98.5           | 0.748          | 98.5           |
| 4                    | 0.020          | 94.2           | 0.117          | 95.0           |
| 5                    | 0.011          | 92.6           | 0.062          | 93.6           |
| 6                    | 0.003          | 96.5           | 0.012          | 96.8           |

Taulukosta 7.4 nähdään, että homeindeksin maksimiarvo ei ylitä asetettua raja-arvoa 1,0 missään tarkastelupisteessä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Sen sijaan suhteellinen kosteus lämmöneristeen yläpinnassa ylittää raja-arvon 98 % RH sekä vuoden 2004 että 2050 ilmastossa. Suhteellinen kosteus on yli 98 % RH yhtäjaksoisesti noin kahden kuukauden ajan tammi-helmikuussa. Ylimääräinen kosteus voi kuitenkin sitoutua lämmöneristeenä käytettävään puukuitueristeseen, joten siitä ei todennäköisesti ole haittaa rakenteen toiminnalle. Taulukosta nähdään myös, että rakenteen toiminnan kannalta

vuoden 2050 olosuhteet ovat kriittisemmät kuin vuoden 2004 olosuhteet. Sekä homeindeksin että suhteellisen kosteuden maksimi-arvot kasvavat ilmastonmuutoksen seurauksena kaikissa tarkastelupisteissä.

Harjakattorakennetta YP2 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisääviä vuotoja luvun 6.6 mukaisesti. Taulukossa 7.5 on esitetty rakenteen homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sadevuodon ja ilmavuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelut tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

**Taulukko 7.5.** Rakenteen YP2 homeindeksin maksimi-arvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{\max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sade- tai ilmavuoto.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 |                |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                      | sadevuoto      |                 | ilmavuoto      |                 |
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 67.9            | 0.006          | 83.6            |
| 2                    | 0              | 69.1            | 0              | 61.3            |
| 3                    | 5.673          | 99.3            | 0.354          | 98.8            |
| 4                    | 5.349          | 99.1            | 0.023          | 94.6            |
| 5                    | 4.584          | 98.5            | 0.026          | 93.0            |
| 6                    | 0.318          | 100.0           | 0.001          | 97.0            |

Taulukosta 7.5 nähdään, että rakenteessa, jossa esiintyy ilmavuoto, homeindeksin maksimi-arvo ei ylitä asetettua kriteeriä  $M_{\max} \leq 1,0$ . Sen sijaan suhteellisen kosteuden maksimi-arvo ylittää kriteerin  $RH_{\max} < 98$  % lämmöneristeen yläpinnassa. Suhteellinen kosteus on tässä pisteessä yli 98 % RH noin 4 kuukauden ajan marraskuun lopusta maaliskuun loppupuolelle saakka. Tässäkin tapauksessa ylimääräisestä kosteudesta ei kuitenkaan todennäköisesti aiheudu merkittävää haittaa rakenteen toiminnalle johtuen puukuitueristeen kosteudensitomiskyvystä. Vertaamalla keskenään vuotamatonta ja vuotavaa rakennetta (taulukot 7.4 ja 7.5) havaitaan, että rakenteessa esiintyvä ilmavuoto kasvattaa homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvoja kaikissa tarkastelupisteissä. Suhteellisen kosteuden kasvu on merkittävin tarkastelupisteessä 1, joka sijaitsee lähellä rakenteen sisäpintaa.

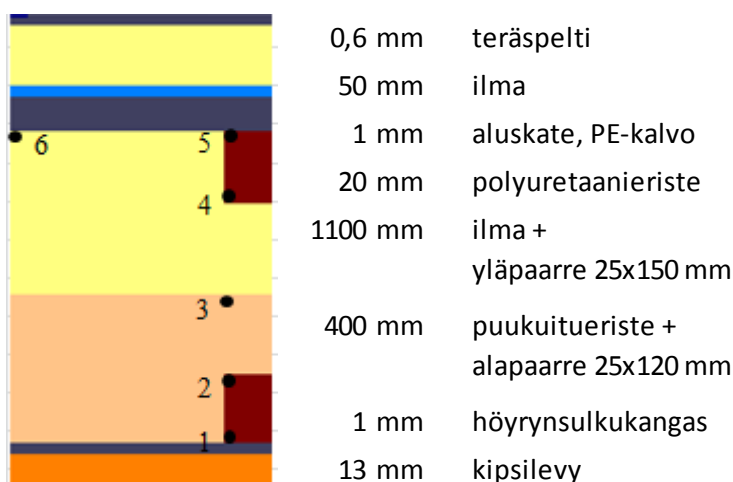
Sadevuodon tapauksessa homeindeksin sallittu maksimi-arvo ylittyy ja homekasvustoa esiintyy lämmöneristeen yläpinnan ja aluskatteen välisellä alueella. Tarkastelupisteissä 3-5 homeindeksi saavuttaa korkeimmillaan lähes arvon  $M_{\max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimi-arvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus on yli 98 % RH yhtäjaksoisesti noin 5-6 kuukauden ajan tarkastelupisteissä 3-6.

Vertaamalla taulukossa 7.4 esitettyjä vuotamattoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.5 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että harjakattorakenteen YP2 kosteustekni-

nen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteeseen pääsee ylimääräistä kosteutta. Sadevuoto lisää homeen kasvua rakenteessa vielä enemmän kuin ilmavuoto ja rakennekerrokset pysyvät jatkuvasti hyvin kosteina. Ilmavuoto kasvattaa erityisesti rakenteen alaosan suhteellista kosteutta kun taas sadevuoto vaikuttaa eniten rakenteen yläosan kosteusolosuhteisiin.

#### 7.1.4 Korjattu harjakattorakenne YP2\_K

Edellisessä luvussa 7.1.3 todettiin, että alkuperäinen harjakattorakenne YP2 ei sellaiseenaan täytä kosteuden kondensoitumiselle asetettua kriteeriä, vaikka siitä ei todennäköisesti aiheudu haittaa rakenteen toiminnalle. Rakennetta parannettiin lisäämällä aluskatteen ja ristikoiden yläpaarteiden väliin lämmöneristeeksi 20 mm polyuretaanilevy. Polyuretaanilevyn pinnat ovat diffuusiotiiviit. Aluskatteena on tavanomainen PE-kalvo, jonka materiaaliominaisuudet vastaavat liitteessä 2 esitetyn kondenssisuojatun aluskatteen yläpinnan ominaisuuksia. Kuvassa 7.4 on esitetty korjatun rakenteen YP2\_K laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuva ei ole mittakaavassa.



**Kuva 7.4.** Korjatun harjakaton YP2\_K laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Tarkastelupisteet 1-6 sijaitsevat kuvan 7.4 mukaisesti rakenteen alaosasta lukien alapaarteiden alanurkassa, alapaarteiden ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, yläpaarteiden alanurkassa, yläpaarteiden ylänurkassa ja lisälämmöneristeen alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.6 on esitetty rakenteen YP2\_K homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

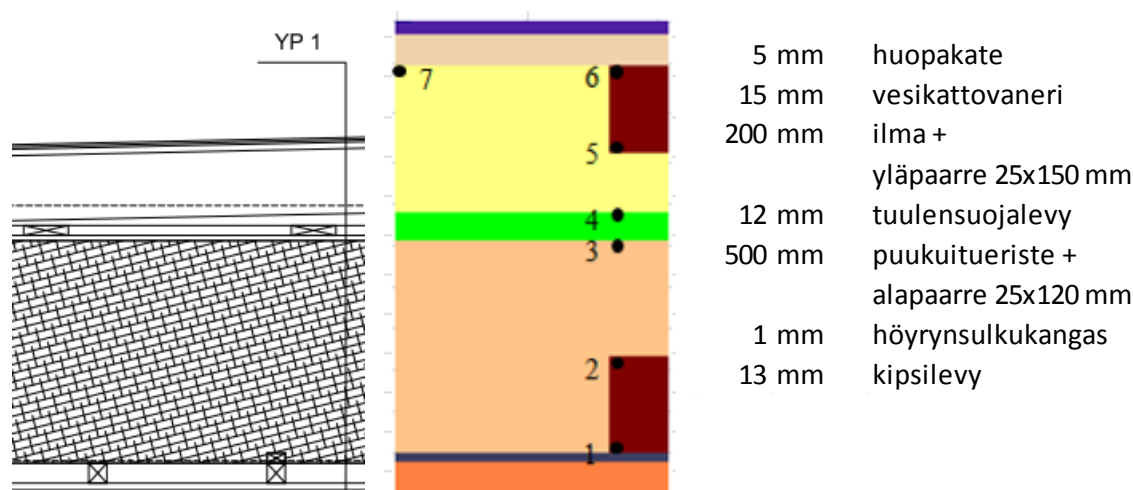
**Taulukko 7.6.** Rakenteen YP2\_K homeindeksin maksimi-arvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{\max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 | Jokioinen 2050 |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 55.8            | 0              | 60.8            |
| 2                    | 0              | 55.6            | 0              | 59.5            |
| 3                    | 0.039          | 95.4            | 0.303          | 95.5            |
| 4                    | 0.012          | 89.8            | 0.06           | 90.8            |
| 5                    | 0.005          | 88.6            | 0.047          | 89.7            |
| 6                    | 0.001          | 92.1            | 0.006          | 93.0            |

Taulukosta 7.6 nähdään, että 20 mm polyuretaanilevyn lisääminen kattoristikoiden yläpuolelle paransi rakenteen toimintaa siten, että rakenne täyttää myös kosteuden kondensoitumiselle asetetun kriteerin  $RH_{\max} < 98$  %. Korjattu rakenne on siis paremmin toimiva myös asetettujen kriteerien osalta. Vertaamalla taulukoita 7.4 ja 7.6 keskenään havaitaan, että aluskatteen yhteyteen lisätty lämmöneriste pienentää homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvoja kaikissa tarkastelupisteissä.

### 7.1.5 Tasakattorakenne puukuitueristeellä TK1\_1

Tasakattorakenteessa TK1\_1 on huopakate vanerialustalla, matala tuuletusväli, puiset kattoristikot, huokoinen puukuitulevy tuulensuojana, 500 mm:n kerros puukuitueristettä, höyrynsulkukerros ja sisäverhousmateriaalina kipsilevy. Höyrynsulkuna rakenteessa on hydrokalvo, jonka diffuusiovastus muuttuu ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden funktiona (RT 38313 2012). Kuvassa 7.5 on esitetty tasakaton TK1\_1 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.5.** Tasakaton TK1\_1 alkuperäinen rakennekuva sekä laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.



Mallinnuksen yhteydessä alkuperäistä rakennetta yksinkertaistettiin luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Tarkastelupisteet 1-7 sijaitsevat kuvan 7.5 mukaisesti rakenteen alaosasta lukien alapaarteen alanurkassa, alapaarteen ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, tuulensuojalevyn yläpinnassa, yläpaarteen alanurkassa, yläpaarteen ylänurkassa ja vesikattovanerin alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.7 on esitetty rakenteen TK1\_1 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

**Taulukko 7.7.** Rakenteen TK1\_1 homeindeksin maksimiarvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 68.6           | 0              | 72.9           |
| 2                    | 0              | 68.9           | 0              | 72.3           |
| 3                    | 0.608          | 94.2           | 0.627          | 92.9           |
| 4                    | 0.715          | 92.3           | 0.696          | 91.5           |
| 5                    | 0.734          | 92.5           | 0.703          | 91.7           |
| 6                    | 0.781          | 91.3           | 0.695          | 90.8           |
| 7                    | 0.309          | 93.1           | 0.324          | 92.1           |

Taulukosta 7.7 nähdään, että homeindeksin maksimiarvo on kaikissa tarkastelupisteissä alle 1,0 sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Suhteellisen kosteuden maksimiarvo ei ylitä asetettua ylärajaa 98 % RH missään tarkastelupisteessä. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista ei siis esiinny, joten alkuperäinen rakenne on toimiva.

Tasakattorakennetta TK1\_1 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisääviä vuotoja luvun 6.6 mukaisesti. Taulukossa 7.8 on esitetty rakenteen homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot sadevuodon ja ilmavuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelut tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

**Taulukko 7.8.** Rakenteen TK1\_1 homeindeksin maksimiarvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sade- tai ilmavuoto.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                |               |                |
|----------------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
|                      | sadevuoto      |                | ilmavuoto     |                |
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-] | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 77.7           | 0.014         | 85.8           |
| 2                    | 0              | 79.6           | 0             | 71.3           |
| 3                    | 5.864          | 99.4           | 2.015         | 96.5           |
| 4                    | 5.995          | 100.0          | 2.115         | 95.0           |
| 5                    | 5.990          | 99.9           | 2.164         | 95.2           |
| 6                    | 5.940          | 99.7           | 2.029         | 93.6           |
| 7                    | 5.257          | 99.9           | 0.790         | 95.7           |

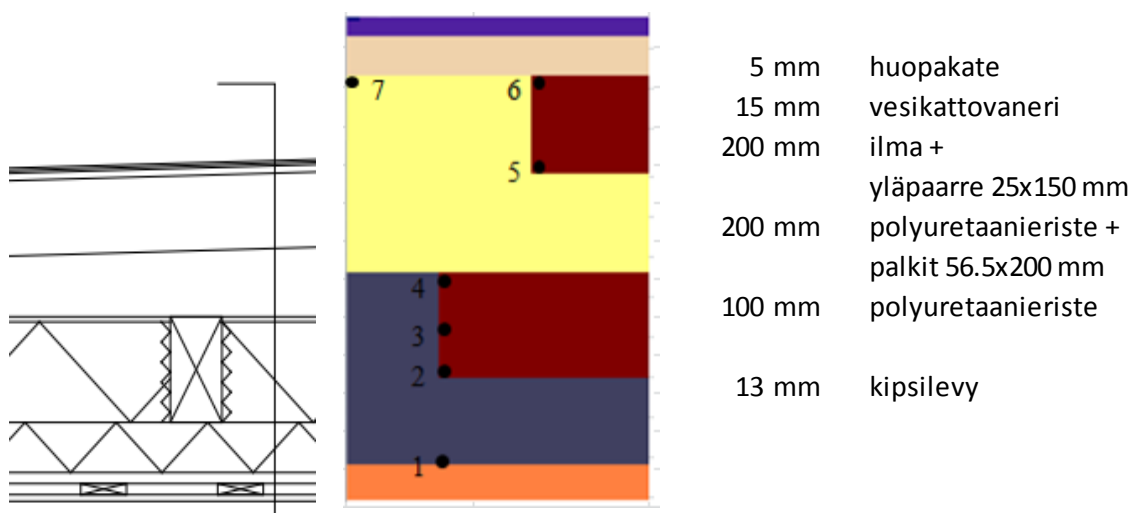
Taulukosta 7.8 nähdään, että sadevuodon tapauksessa homeindeksin sallittu maksimiarvo ylittyy ja homekasvustoa esiintyy lämmöneristeen yläpinnan ja vesikattovanerin alapinnan välisellä alueella. Tarkastelupisteissä 3-7 homeindeksi saavuttaa lähes arvon  $M_{\max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimiarvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus ylittää 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuhetkestä eikä laske tämän jälkeen enää lainkaan alle 98 %:n laskenta-ajan ollessa kaksi vuotta. Ilmavuodon tapauksessa homeindeksin maksimiarvo ylittää asetetun raja-arvon tarkastelupisteissä 3-6. Homeindeksin maksimiarvo rakenteessa ilmavuodon tapauksessa on noin 2, joten rakenteessa esiintyy selvää mikroskoopilla havaittavaa homekasvua. Suhteellinen kosteus ei ilmavuodon tapauksessa sen sijaan ylitä arvoa 98 % RH missään tarkastelupisteessä.

Vertaamalla taulukossa 7.7 esitettyjä vuotamattoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.8 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että tasakattorakenteen TK1\_1 kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteeseen pääsee ylimääräistä kosteutta. Sadevuoto lisää homeen kasvua rakenteessa vielä enemmän kuin ilmavuoto ja rakennekerrokset pysyvät jatkuvasti hyvin kosteina. Ilmavuoto kasvattaa erityisesti rakenteen alaosan suhteellista kosteutta, kun taas sadevuoto vaikuttaa eniten rakenteen yläosan kosteusolosuhteisiin.

#### **7.1.6 Tasakattorakenne polyuretaanieristeellä TK1\_2**

Edellisessä luvussa 7.1.5 esitettyä tasakattorakennetta TK1\_1 tarkasteltiin myös siten, että puukuitueristeen tilalle vaihdettiin polyuretaanieriste. Polyuretaanieristeen paksuus valittiin siten, että sen lämmönvastus vastasi alkuperäisen rakenteen puukuitueristekerroksen lämmönvastusta. Kun puhalluseriste vaihdettiin levyeristeeseen, vaihdettiin myös kantavat ristikkorakenteet palkkirakenteeseen, jotta uusi rakenne olisi mahdollinen toteuttaa käytännössä. Vertailun vuoksi polyuretaanilla eristetyn palkkirakenteisen yläpohjan laskentatuloksia verrattiin polyuretaanilla eristetyn ristikkoyläpohjan laskentatuloksiin ja erot todettiin pieniksi.

Tasakattorakenteessa TK1\_2 on huopakate vanerialustalla, puiset kattoristikot, matala tuuletusväli, polyuretaanieriste ja kantavat puupalkit sekä sisäverhousmateriaalina kipsilevy. Rakenteessa ei ole erillistä höyrynsulkukerrosta, vaan polyuretaanilevy toimii höyrynsulkuna. Kuvassa 7.6 on esitetty tasakaton TK1\_2 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.6.** Tasakaton TK1\_2 rakennekuva sekä laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Mallinnuksen yhteydessä polyuretaanilevyjen pintoihin lisättiin diffuusiovastukset ( $s_d=60$  m) kuvaamaan levyn pinnoissa olevaa diffuusiotiivistä alumiinilaminaattia. Alkuperäistä rakennetta myös yksinkertaistettiin luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Tarkastelupisteet 1-7 sijaitsivat kuvan 7.6 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien polyuretaanilevyn alapinnassa, palkin alanurkassa, palkin korkeuden puolivälissä, palkin ylänurkassa, yläpaarteiden alanurkassa, yläpaarteiden ylänurkassa ja vesikattovanerin alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.9 on esitetty rakenteen TK1\_2 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

**Taulukko 7.9.** Rakenteen TK1\_2 homeindeksin maksimiarvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0.087          | 88.6           | 0.288          | 92.0           |
| 2                    | 0.008          | 80.1           | 0.070          | 80.3           |
| 3                    | 0.577          | 81.0           | 0.685          | 81.1           |
| 4                    | 0.002          | 81.7           | 0.002          | 81.6           |
| 5                    | 0              | 80.4           | 0              | 80.3           |
| 6                    | 0              | 77.7           | 0              | 77.8           |
| 7                    | 0              | 78.1           | 0              | 78.3           |

Taulukosta 7.9 nähdään, että homeindeksin maksimiarvo on kaikissa tarkastelupisteissä alle 1,0 sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Suhteellisen kosteuden maksimiarvo ei ylitä asetettua ylärajaa 98 % RH missään tarkastelupisteessä. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista ei siis esiinny, joten alkuperäinen rakenne on toimiva.

Tasakattorakennetta TK1\_2 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisäävä sadevuoto. Taulukossa 7.10 on esitetty rakenteen homeindeksin

ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot sadevuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelu tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

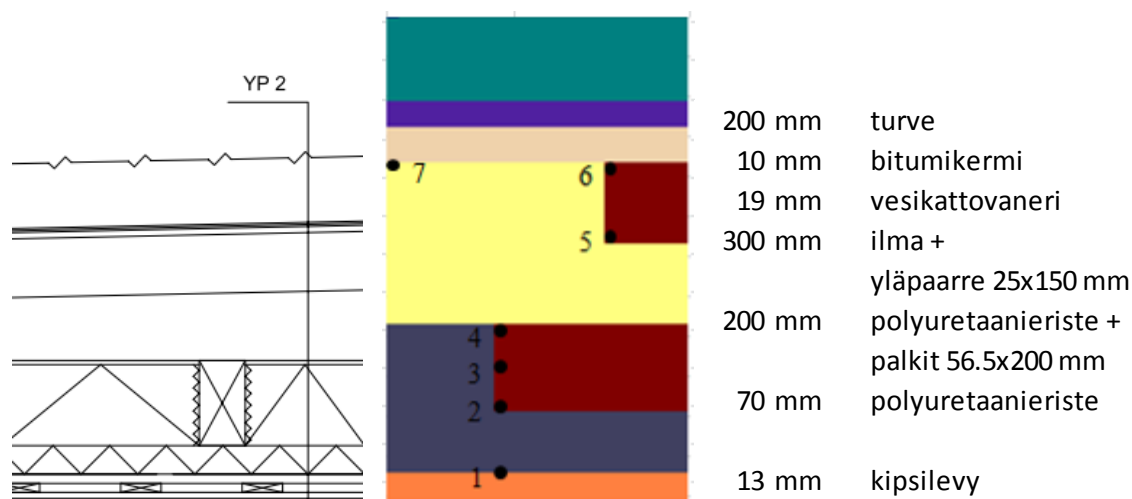
**Taulukko 7.10.** Rakenteen TK1\_2 homeindeksin maksimiarvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{\max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sadevuoto.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|
|                      | sadevuoto      |                 |
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0.087          | 88.6            |
| 2                    | 0.063          | 80.3            |
| 3                    | 1.389          | 83.2            |
| 4                    | 5.996          | 100.0           |
| 5                    | 5.985          | 99.8            |
| 6                    | 5.928          | 99.7            |
| 7                    | 5.251          | 100.0           |

Sadevuodon tapauksessa homeindeksin sallittu maksimiarvo ylittyy taulukon 7.10 osoittamalla tavalla ja homekasvustoa esiintyy kantavan palkin ja vesikattovanerin välisellä alueella. Tarkastelupisteissä 4-7 homeindeksi saavuttaa lähes arvon  $M_{\max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimiarvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus ylittää 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuketkistä eikä laske tämän jälkeen enää lainkaan alle 98 %:n laskenta-ajan ollessa kaksi vuotta. Vertaamalla taulukossa 7.9 esitettyjä vuotamatoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.10 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että harjakattorakenteen YP1 kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteessa on sadevuoto. Sadevuoto vaikuttaa eniten rakenteen yläosan kosteusolosuhteisiin pitäen rakennekerrokset jatkuvasti hyvin kosteina.

### 7.1.7 Viherkattorakenne polyuretaanieristeellä TK2\_1

Tasakattorakenne TK2\_1 on viherkatto. Sen rakennekerrokset ovat ylhäältä lukien turvelevy, huopakate, vesikattovaneri, matala tuuletusväli, puiset kattoristikot, polyuretaanieriste ja kantavat puupalkit sekä sisäverhousmateriaalina kipsilevy. Rakenteessa ei ole erillistä höyrynsulkukerrosta, vaan polyuretaanilevy toimii höyrynsulkuna. Kuvassa 7.7 on esitetty tasakaton TK2\_1 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.7.** Tasakaton TK2\_1 alkuperäinen rakennekuva sekä laskentamalli materiaali-kerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Mallinnuksen yhteydessä polyuretaanilevyjen pintoihin lisättiin diffuusiovastukset ( $s_d=60$  m) kuvaamaan levyn pinnoissa olevaa diffuusiotiivistä alumiinilaminaattia. Alkuperäistä rakennetta myös yksinkertaistettiin luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Tarkastelupisteet 1-7 sijaitsivat kuvan 7.7 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien polyuretaanilevyn alapinnassa, palkin alanurkassa, palkin korkeuden puolivälissä, palkin ylänurkassa, yläpaarteiden alanurkassa, yläpaarteiden ylänurkassa ja vesikattovanerin alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.11 on esitetty rakenteen TK2\_1 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

**Taulukko 7.11.** Rakenteen TK2\_1 homeindeksin maksimiarvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0.089          | 88.7           | 0.292          | 92.1           |
| 2                    | 0              | 79.4           | 0              | 79.8           |
| 3                    | 0.531          | 80.6           | 0.607          | 80.7           |
| 4                    | 0              | 76.8           | 0              | 77.2           |
| 5                    | 0              | 77.4           | 0              | 77.7           |
| 6                    | 0              | 78.0           | 0              | 78.2           |
| 7                    | 0              | 78.3           | 0              | 78.6           |

Taulukosta 7.11 nähdään, että homeindeksin maksimiarvo on kaikissa tarkastelupisteissä selvästi alle 1,0 sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Suhteellisen kosteuden maksimiarvo ei ylitä asetettua ylärajaa 98 % RH missään tarkastelupisteessä. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista ei siis esiinny, joten alkuperäinen rakenne on toimiva.

Tasakattorakennetta TK2\_1 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisäävä sadevuoto. Taulukossa 7.12 on esitetty rakenteen homeindeksin

ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot sadevuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelu tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

**Taulukko 7.12.** Rakenteen TK2\_1 homeindeksin maksimiarvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{\max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sadevuoto.

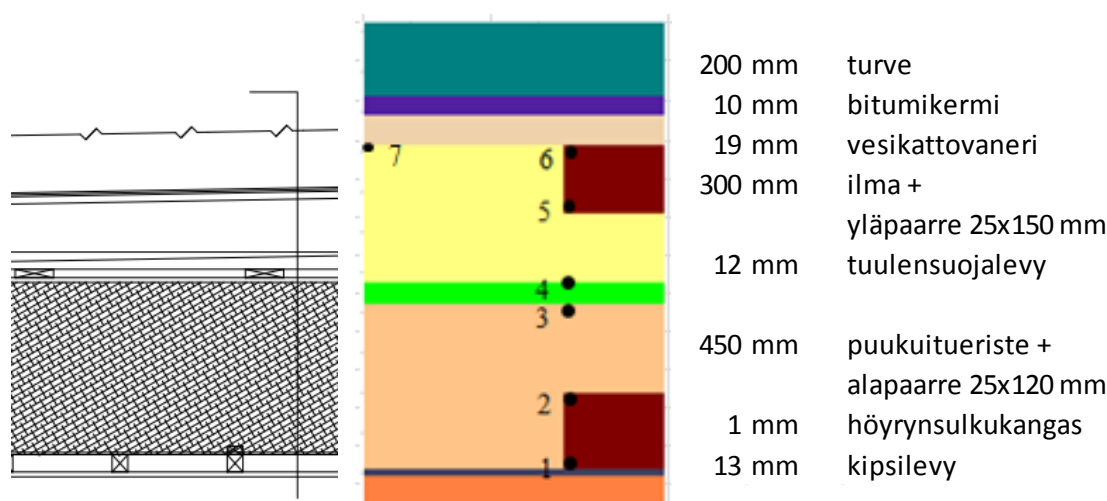
| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|
|                      | sadevuoto      |                 |
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0.089          | 88.7            |
| 2                    | 0              | 79.7            |
| 3                    | 1.491          | 82.9            |
| 4                    | 5.976          | 99.9            |
| 5                    | 5.987          | 99.9            |
| 6                    | 5.936          | 99.6            |
| 7                    | 5.271          | 99.9            |

Taulukosta 7.12 nähdään, että homeindeksin maksimiarvo ylittää asetetun kriteerin  $M_{\max} \leq 1,0$  kantavan palkin puolivälistä vesikattovanerin alapintaan ulottuvalla alueella. Tarkastelupisteissä 4-7 homeindeksi saavuttaa lähes arvon  $M_{\max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimiarvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus ylittää 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuehetkestä eikä laske tämän jälkeen enää lainkaan alle 98 %:n laskenta-ajan ollessa kaksi vuotta. Vertaamalla taulukossa 7.11 esitettyjä vuotamattoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.12 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että tasakattorakenteen TK2\_1 kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteeseen pääsee ylimääräistä kosteutta. Sadevuoto lisää homeen kasvua rakenteessa huomattavasti ja rakennekerrokset pysyvät jatkuvasti hyvin kosteina.

### 7.1.8 Viherkattorakenne puukuitueristeellä TK2\_2

Edellisessä luvussa 7.1.7 esitettyä viherkattorakennetta TK2\_1 tarkasteltiin myös siten, että polyuretaanieristeen tilalle vaihdettiin puukuitueriste. Puukuitueristeen paksuus valittiin sellaiseksi, että sen lämmönvastus vastasi alkuperäisen rakenteen polyuretaanieristekerroksen lämmönvastusta. Kun levyeriste vaihdettiin puhalluseristeeseen, vaihdettiin myös kantavat palkkirakenteet ristikkorakenteeseen.

Viherkattorakenteen TK2\_2 rakennekerrokset ovat turvelevy, huopakate vanerialustalla, matala tuuletusväli, puiset kattoristikot, huokoinen puukuitulevy tuulensuojana, 450 mm:n kerros puukuitueristettä, höyrynsulkukerros ja sisäverhousmateriaalina kipsilevy. Höyrynsulkuna rakenteessa on hygrokalvo, jonka diffuusiovastus muuttuu ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden funktiona (RT 38313 2012). Kuvassa 7.8 on esitetty tasakaton TK2\_2 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.8.** Tasakaton TK2\_2 rakennekuva sekä laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Mallinnuksen yhteydessä alkuperäistä rakennetta yksinkertaistettiin luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Tarkastelupisteet 1-7 sijaitsevat kuvan 7.8 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien alapaarteiden alanurkassa, alapaarteiden ylänurkassa, lämmöneristekerroksen yläpinnassa, tuulensuojalevyn yläpinnassa, yläpaarteiden alanurkassa, yläpaarteiden ylänurkassa ja vesikattovanerin alapinnassa yläpaarteiden k-jaon keskellä. Taulukossa 7.13 on esitetty rakenteen TK2\_2 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

**Taulukko 7.13.** Rakenteen TK2\_2 homeindeksin maksimiarvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelupiste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1               | 0              | 66.5           | 0              | 70.9           |
| 2               | 0              | 66.5           | 0              | 69.9           |
| 3               | 0.257          | 93.3           | 0.351          | 92.1           |
| 4               | 0.415          | 91.3           | 0.502          | 90.7           |
| 5               | 0.522          | 90.6           | 0.567          | 89.9           |
| 6               | 0.751          | 89.9           | 0.689          | 89.4           |
| 7               | 0.303          | 91.1           | 0.330          | 90.4           |

Taulukosta 7.13 nähdään, että homeindeksin maksimiarvo on kaikissa tarkastelupisteissä alle 1,0 sekä nykyisessä että tulevaisuuden ilmastossa. Suhteellisen kosteuden maksimiarvo ei ylitä asetettua ylärajaa 98 % RH missään tarkastelupisteessä. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista ei siis esiinny, joten alkuperäinen rakenne on toimiva.

Tasakattorakennetta TK2\_2 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisääviä vuotoja luvun 6.6 mukaisesti. Taulukossa 7.14 on esitetty rakenteen homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sadevuodon ja ilmavuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelut tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

**Taulukko 7.14.** Rakenteen TK2\_2 homeindeksin maksimi-arvot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sade- tai ilmavuoto.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                |               |                |
|----------------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
|                      | sadevuoto      |                | ilmavuoto     |                |
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-] | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 77.3           | 0.013         | 85.5           |
| 2                    | 0              | 79.3           | 0             | 69.7           |
| 3                    | 5.855          | 99.3           | 1.195         | 96.2           |
| 4                    | 5.990          | 99.9           | 1.400         | 93.8           |
| 5                    | 5.988          | 99.9           | 1.621         | 92.8           |
| 6                    | 5.935          | 99.6           | 1.933         | 91.9           |
| 7                    | 5.269          | 99.9           | 0.805         | 93.6           |

Taulukosta 7.14 nähdään, että sadevuodon tapauksessa homeindeksin sallittu maksimi-arvo ylittyy ja homekasvustoa esiintyy lämmöneristeen yläpinnan ja vesikattovanerin alapinnan välisellä alueella. Tarkastelupisteissä 3-7 homeindeksi saavuttaa lähes arvon  $M_{max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimi-arvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus ylittää 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuehetestä eikä laske tämän jälkeen enää lainkaan alle 98 %:n laskenta-ajan ollessa kaksi vuotta. Ilmavuodon tapauksessa homeindeksin maksimi-arvo ylittää asetetun raja-arvon tarkastelupisteissä 3-6. Homeindeksin maksimi-arvo rakenteessa ilmavuodon tapauksessa on noin 2, joten rakenteessa esiintyy selvää mikroskoopilla havaittavaa homekasvua. Suhteellinen kosteus ei ilmavuodon tapauksessa sen sijaan ylitä arvoa 98 % RH missään tarkastelupisteessä.

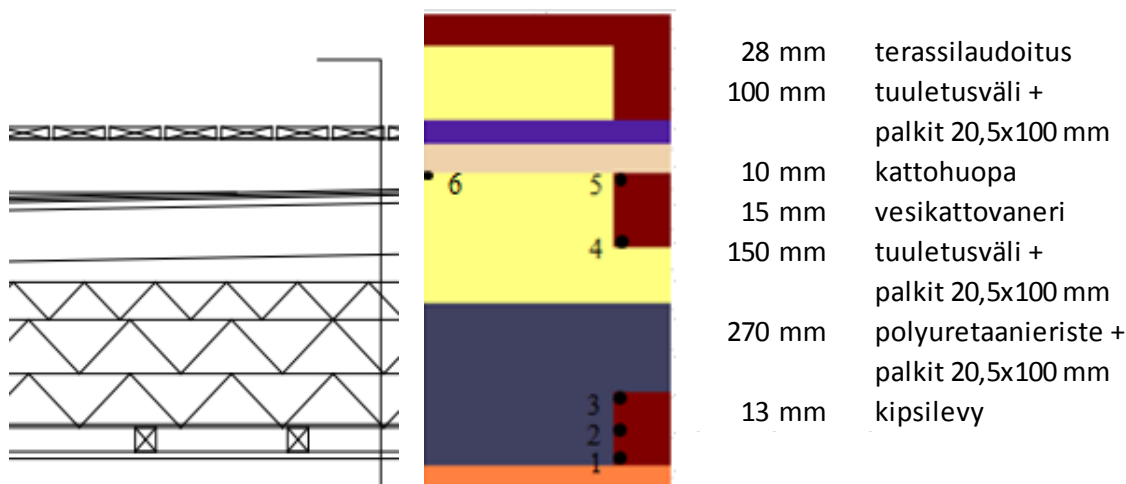
Vertaamalla taulukossa 7.13 esitettyjä vuotamattoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.14 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että tasakattorakenteen TK2\_2 kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteeseen pääsee ylimääräistä kosteutta. Sadevuoto lisää homeen kasvua rakenteessa vielä enemmän kuin ilmavuoto ja rakennekerrokset pysyvät jatkuvasti hyvin kosteina. Ilmavuoto kasvattaa erityisesti rakenteen alaosan suhteellista kosteutta kun taas sadevuoto vaikuttaa eniten rakenteen yläosan kosteusolosuhteisiin.

### 7.1.9 Terassikattorakenne TK3

Tasakattorakenne TK3 on terassikatto. Sen rakennekerrokset ovat ylhäältä lukien terassilautoitus, tuuletusväli ja puupalkit, kattohuopa, vesikattovaneri, matala tuuletusväli ja



puupalkit, polyuretaanieriste ja puupalkit sekä sisäverhousmateriaalina kipsilevy. Rakenteessa ei ole erillistä höyrynsulkukerrosta, vaan polyuretaanilevy toimii höyrynsulkuna. Kuvassa 7.9 on esitetty tasakaton TK3 rakennekuva ja laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen. Kuvat eivät ole mittakaavassa.



**Kuva 7.9.** Tasakaton TK3 rakennekuva sekä laskentamalli materiaalikerroksineen ja tarkastelupisteineen.

Mallinnuksen yhteydessä polyuretaanilevyjen pintoihin lisättiin diffuusiiovastukset ( $s_d=60$  m) kuvaamaan levyn pinnoissa olevaa diffuusiotiivistä alumiinilaminaattia. Alkuperäistä rakennetta myös yksinkertaistettiin luvussa 6.3 kuvatulla tavalla. Tarkastelupisteet 1-6 sijaitsevat kuvan 7.9 mukaisesti rakenteen alaosaan lukien alimman palkin alanurkassa, sen korkeuden puolivälissä ja ylänurkassa, keskimmäisen palkin alanurkassa ja ylänurkassa sekä vesikattovanerin alapinnassa palkkien k-jaon keskellä. Taulukossa 7.15 on esitetty rakenteen TK3 homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiavot vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa.

**Taulukko 7.15.** Rakenteen TK3 homeindeksin maksimiavot  $M_{max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimiavot  $RH_{max}$  nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                | Jokioinen 2050 |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] | $M_{max}$ [-]  | $RH_{max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 78.4           | 0.032          | 82.3           |
| 2                    | 0              | 76.1           | 0              | 76.7           |
| 3                    | 0              | 79.6           | 0              | 79.7           |
| 4                    | 0              | 79.1           | 0              | 79.2           |
| 5                    | 0              | 79.3           | 0              | 79.4           |
| 6                    | 0              | 78.7           | 0              | 78.8           |

Taulukosta 7.15 nähdään, että homeindeksin maksimiavot on nolla kaikissa tarkastelupisteissä nykyilmastossa. Tulevaisuuden ilmastossa homeindeksi on korkeimmillaan 0,032, mikä on selvästi alle asetetun raja-arvon 1,0. Suhteellisen kosteuden maksimiavot

vo ei ylitä asetettua ylärajaa 98 % RH missään tarkastelupisteessä. Homeen kasvua ja kosteuden kondensoitumista ei siis esiinny, joten alkuperäinen rakenne on toimiva.

Tasakattorakennetta TK3 tarkasteltiin myös siten, että siihen kohdistui rakenteen kosteuskuormitusta lisäävä sadevuoto. Taulukossa 7.16 on esitetty rakenteen homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sadevuodon tapauksessa. Raja-arvojen ylittyminen on merkitty taulukkoon punaisella. Tarkastelu tehtiin vuoden 2004 ilmastossa.

**Taulukko 7.16.** Rakenteen TK3 homeindeksin maksimi-arvot  $M_{\max}$  ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot  $RH_{\max}$  nykyilmastossa, kun rakenteessa on sadevuoto.

| tarkastelu-<br>piste | Jokioinen 2004 |                 |
|----------------------|----------------|-----------------|
|                      | sadevuoto      |                 |
|                      | $M_{\max}$ [-] | $RH_{\max}$ [%] |
| 1                    | 0              | 78.4            |
| 2                    | 0              | 75.0            |
| 3                    | 0              | 79.3            |
| 4                    | 5.992          | 99.9            |
| 5                    | 5.970          | 99.9            |
| 6                    | 5.288          | 99.9            |

Taulukosta 7.16 nähdään, että homeindeksin maksimi-arvo ylittää asetetun kriteerin  $M_{\max} \leq 1,0$  lämmöneristekerroksen yläpuolella olevissa tarkastelupisteissä 4-6. Homeindeksi saavuttaa näissä pisteissä lähes arvon  $M_{\max}=6$ , joten rakenteessa esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Myös suhteellinen kosteus ylittää sallitun maksimi-arvon samalla alueella. Suhteellinen kosteus ylittää 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuhetkestä eikä laske tämän jälkeen enää lainkaan alle 98 %:n laskenta-ajan ollessa kaksi vuotta. Vertaamalla taulukossa 7.15 esitettyjä vuotamattoman rakenteen tuloksia ja taulukon 7.16 vuotavan rakenteen tuloksia voidaan todeta, että tasakattorakenteen TK2\_1 kosteustekninen toiminta heikkenee merkittävästi, jos rakenteeseen pääsee ylimääristä kosteutta.

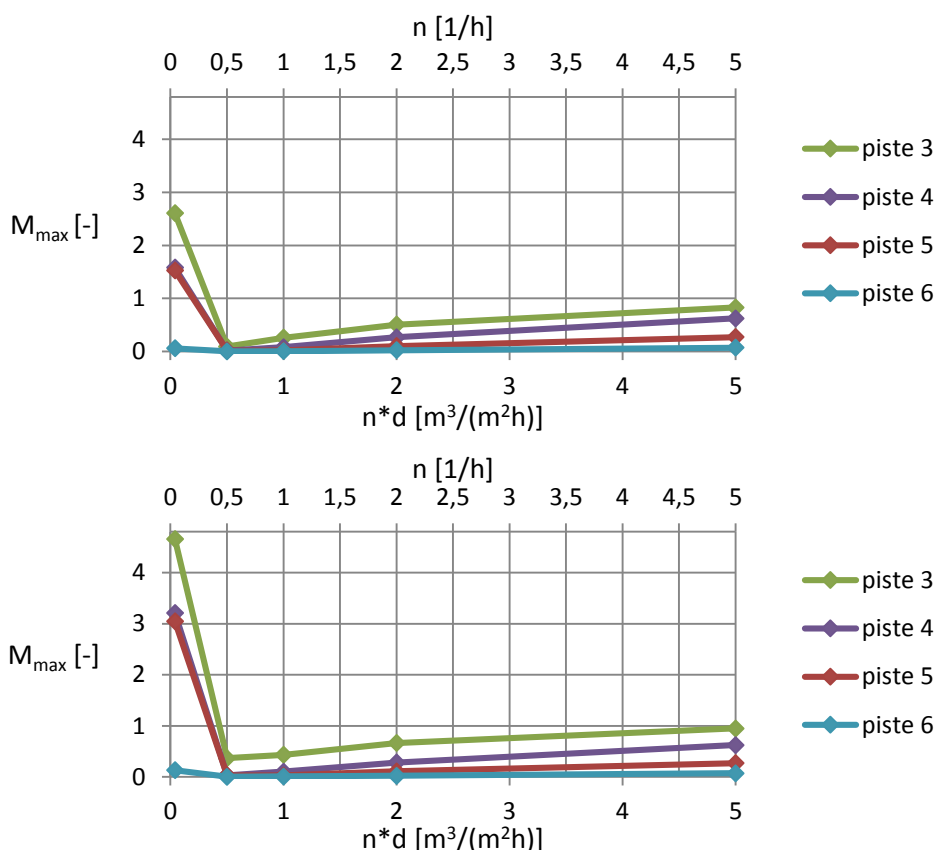
## 7.2 Ilmanvaihtuvuuden merkitys

Tutkimuksessa tehtiin edellä esitettyjen yläpohjarakenteiden laskennallisten tarkastelujen lisäksi runsaasti erilaisia vertailu- ja testilaskentoja, jotta tulosten johdonmukaisuudesta voitiin varmistua. Vertailulaskelmissa havaittiin ilmanvaihtuvuuden vaikuttavan ennakoitua enemmän yläpohjarakenteiden kosteusolosuhteisiin ja siten myös homeindeksin maksimi-arvoihin. Ilmanvaihtuvuuden vaikutuksen havainnollistamiseksi harjakattorakennetta YP1 ja tasakattorakennetta TK1\_1 tarkasteltiin laajemmin varioimalla niiden tuuletusvälin ilmanvaihtokerrointa  $n$  (1/h). Tarkoituksena oli etsiä ilmanvaihtuvuudelle sallittu vaihteluväli, jonka sisällä homeindeksin maksimi-arvo täyttäisi ehdon  $M_{\max} \leq 1,0$ . Ilmanvaihtokerrointa varioitiin sekä vuotamattomalle rakenteelle että rakenteelle, jossa esiintyi ilmavuoto sisätilasta. Tavoitteena oli selvittää, voidaanko ilmavuo-

don aiheuttama rakenteen kosteusteknisen toiminnan heikentyminen kompensoida rakenteen optimaalisella ilmanvaihdolla. Sadevuototapauksissa sen sijaan homeindeksin havaittiin luvun 7.1 mukaisesti kohoavan niin korkeaksi, että kosteusolosuhteita ei voitaisi riittävästi parantaa rakenteen ilmanvaihtoa lisäämällä.

Ilmanvaihtokerroin  $n$  (1/h) kertoo, kuinka monta kertaa tunnissa tuuletusvälin ilma vaihtuu. Yläpohjarakenteiden kosteusolosuhteiden kannalta ratkaisevaa ei ole kuitenkaan ilmanvaihtokerroin itsessään, vaan se, kuinka paljon ulkoilmaa kulkee tuuletusvälin kautta aikayksikköä kohti (esim.  $\text{m}^3/\text{h}$ ). Tuuletusvälin korkeuden muuttuessa sama ilmanvaihtokerroin (1/h) tuottaa siis erilaisen ilmanvaihtomäärän ( $\text{m}^3/\text{h}$ ). Kääntäen sama ilmanvaihtomäärä ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) saadaan aikaan erilaisella ilmanvaihtokertoimella (1/h) riippuen rakenteiden tuuletusvälin korkeudesta. Harjakatto- ja tasakattorakenteen tulosten keskinäisen vertailemisen helpottamiseksi tämän luvun kuvaajiin on merkitty x-akselille sekä ilmanvaihtokerroin  $n$  (1/h) että ilmanvaihtomäärä. Ilmanvaihtomäärä ( $n \cdot d$ , jossa  $d$  on tuuletusvälin korkeus) on ilmoitettu yksikössä  $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ , joten se kuvaa tarvittavan tuuletusilman määrän ( $\text{m}^3$ ) yläpohjan  $1 \text{ m}^2$ :n pinta-alaa kohti tuuletusvälin korkeuden ollessa vakio. Harjakattorakenteen laskentamallissa tuuletusvälin korkeus oli 1000 mm ja tasakaton laskentamallissa 200 mm.

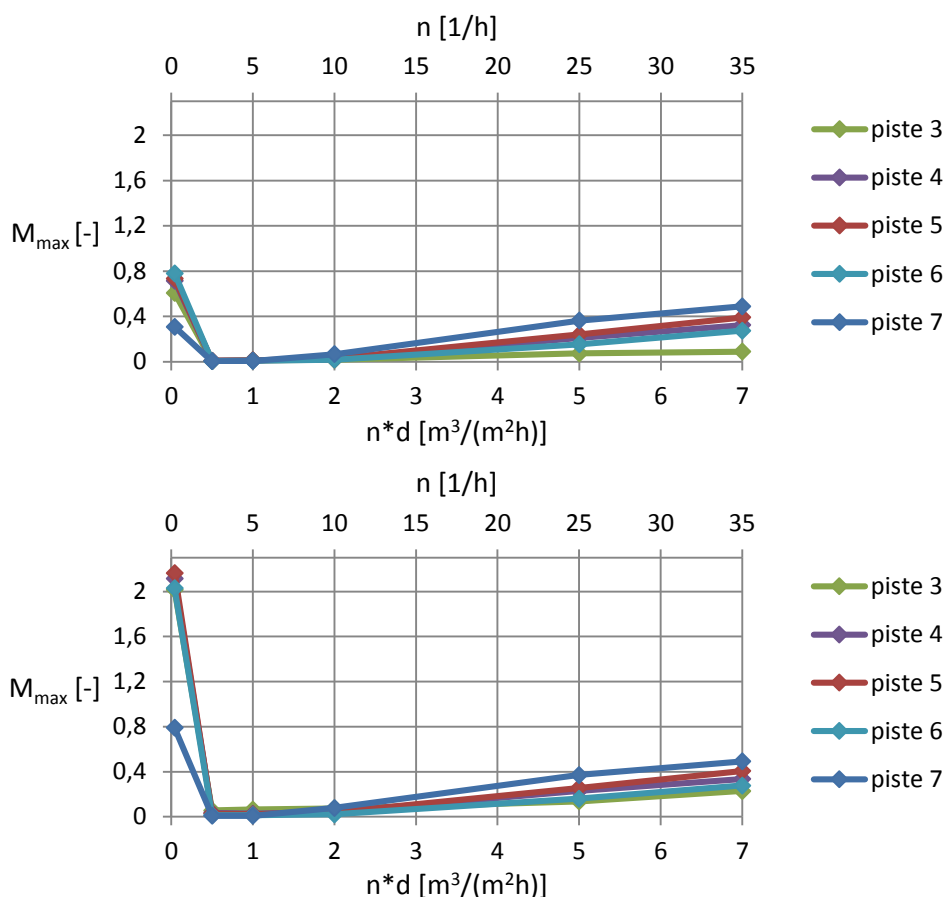
Kuvassa 7.10 on esitetty harjakattorakenteen YP1 homeindeksin maksimiarvot tarkastelupisteissä 3-6 eri ilmanvaihtuvuuksilla. Ylemmässä kuvaajassa on vuotamattoman rakenteen tulokset ja alempi kuvaaja esittää rakennetta, jossa on ilmavuoto.



**Kuva 7.10.** Rakenteen YPI homeindeksin maksimi-arvot tarkastelupisteissä 3-6 eri ilmanvaihtuvuuksilla Jokioisen 2004 ilmastossa, kun rakenteessa ei ole vuotoja (yläriivi) ja kun rakenteessa on ilmavuoto (alarivi).

Kuvan 7.10 perusteella harjakattorakenteen optimaalinen ilmanvaihtokerroin on noin 0,5-1 1/h. Tätä vastaava tuuletusilman määrä on noin 0,5-1  $m^3/(m^2h)$  tuuletustilan korkeuden ollessa 1000 mm. Rakenteen toiminta heikkenee ilmanvaihtuvuuden ollessa merkittävästi tätä pienempi tai suurempi. Homeindeksin maksimi-arvo on alle 1,0 ilmanvaihtokertoimen ollessa noin 0,5-5 1/h. Rakenteessa oleva ilmavuoto aiheuttaa hyvin pienellä ilmanvaihtuvuudella korkeamman homeindeksin maksimi-arvon kuin vuotamattomassa rakenteessa. Ilmanvaihtuvuuden kasvaessa yhä suurempi osa rakenteeseen tulevästä kosteudesta on peräisin tuuletusilmasta, jolloin ilmavuodon merkitys rakenteen toiminnalle vähenee. Ilmanvaihtokertoimen ollessa 0,5 1/h toimivat vuotamaton ja ilmavuodollinen rakenne jo likimain yhtä hyvin.

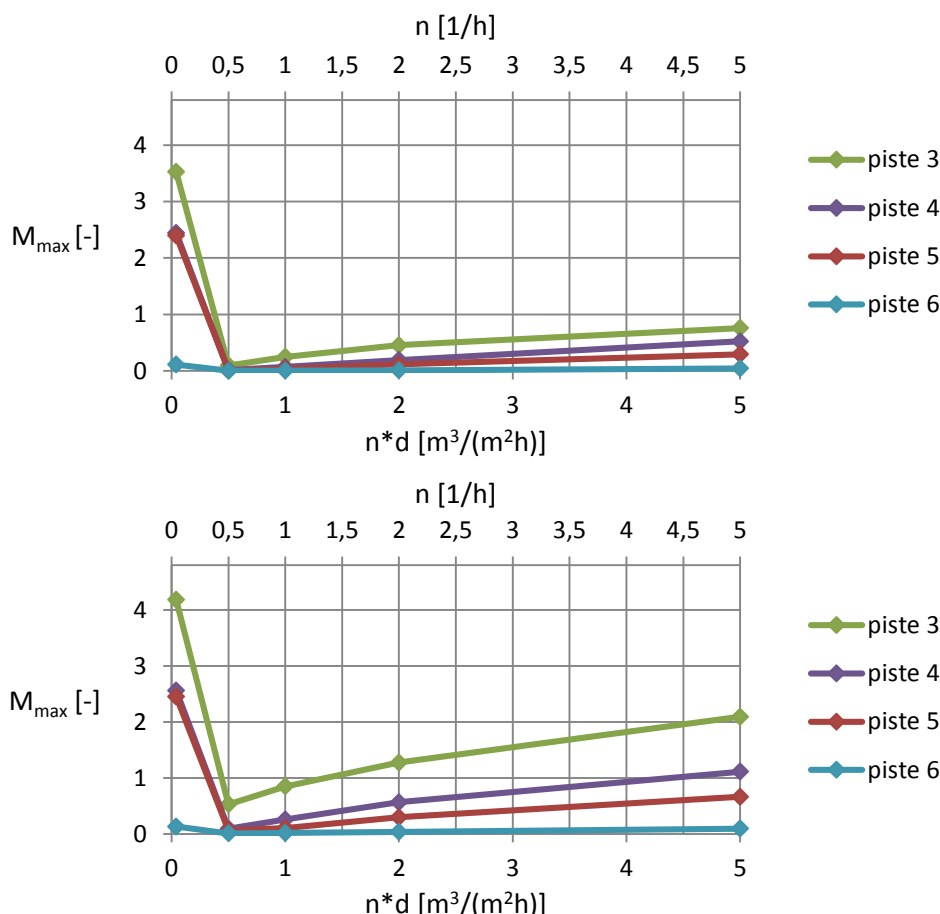
Kuvassa 7.11 on vastaavat homeindeksin maksimi-arvot tasakattorakenteen TK1\_1 tarkastelupisteistä 3-7. Ylempässä kuvaajassa on vuotamattoman rakenteen ja alemmassa ilmavuodollisen rakenteen tulokset.



**Kuva 7.11.** Rakenteen TK1\_1 homeindeksin maksimiarvot tarkastelupisteissä 3-7 eri ilmanvaihtuvuuksilla Jokioisen 2004 ilmastossa, kun rakenteessa ei ole vuotoja (ylärivi) ja kun rakenteessa on ilmavuoto (alarivi).

Kuvasta 7.11 huomataan, että homeindeksin kannalta edullisin ilmanvaihtokerroin tasakatolle, jonka tuuletusvälin korkeus on 200 mm, on noin 2,5-5 1/h. Tätä vastaava tuuletusilman määrä on noin 0,5-1 m³/(m²h) kuten harjakattorakenteellakin. Tasakattorakenteen toiminta heikkenee kuvaajien mukaisesti, jos ilmanvaihtokerrointa pienennetään tai suurennetaan tästä arvosta. Ilmanvaihdon kasvattaminen arvoon  $n=35$  1/h saakka ei saa homeindeksin maksimiarvoa kohoamaan tasakatossa yli 1,0:n. Myös tasakattorakenteessa ilmavuodon vaikutus homeindeksin maksimiarvoon on suurimmillaan ilmanvaihtuvuuden ollessa hyvin pieni.

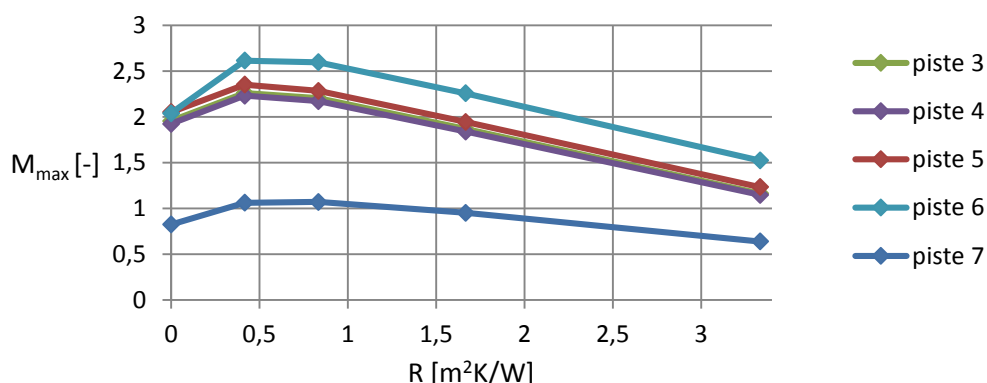
Ilmanvaihtuvuuden vaikutusta harjakattorakenteen YP1 toimintaan tarkasteltiin lisäksi vuosien 2004 ja 2050 ilmastossa, kun aluskatteen yhteyteen lisättiin lämpöä eristävä kerros ja rakenteessa oli ilmavuoto. Lämmöneristekerroksen lämmönvastus oli 0,4 m²K/W. Kuvassa 7.12 on esitetty tämän tarkastelun tuloksena saadut homeindeksin maksimiarvot tarkastelupisteissä 3-6 eri ilmanvaihtuvuuksilla.



**Kuva 7.12.** Lisäeristetyin rakenteen YPI homeindeksin maksimi-arvot tarkastelupisteissä 3-6 eri ilmanvaihtuvuuksilla Jokioisen 2004 (yläriivi) ja 2050 (alarivi) ilmastossa, kun rakenteessa on ilmavuoto.

Kuvia 7.10 ja 7.12 vertaamalla huomataan, että aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen pienentää homeindeksin maksimi-arvoa nykyilmastossa kaikissa tarkastelupisteissä eri ilmanvaihtuvuuksilla. Tulevaisuuden ilmastossa lisäeristetyin harjakattorarakenteen homeindeksin arvot ovat korkeampia kuin nykyilmastossa, kun rakenteessa on ilmavuoto. Kuitenkin myös vuoden 2050 ilmastossa harjakattorarakenteen homeindeksin maksimi-arvoksi on mahdollista saada alle 1,0 valitsemalla ilmanvaihtuvuudeksi noin 0,5-1 m³/(m²h). Tätä pienemmällä tai suuremmalla ilmanvaihtuvuudella homeen kasvu rakenteessa on mahdollista vaikka aluskate on lämpöä eristävä.

Tasakattorarakenteessa TK1\_1 homeindeksin maksimi-arvoksi saatiin kuvan 7.11 mukaisesti noin 2, kun ilmanvaihtuvuus oli hyvin pieni ja rakenteessa oli ilmavuoto. Kuvassa 7.13 on esitetty rakenteen ulko-osan lämmönvastuksen kasvattamisen vaikutus saman tasakattorarakenteen homeindeksin maksimi-arvoon, kun rakenteen ilmanvaihtokerroin on 0,2 1/h ja rakenteessa on ilmavuoto. Lämmönvastusta kasvatettiin lisäämällä lämmöneristettä bitumikermin ja vesikattovanerin väliin.

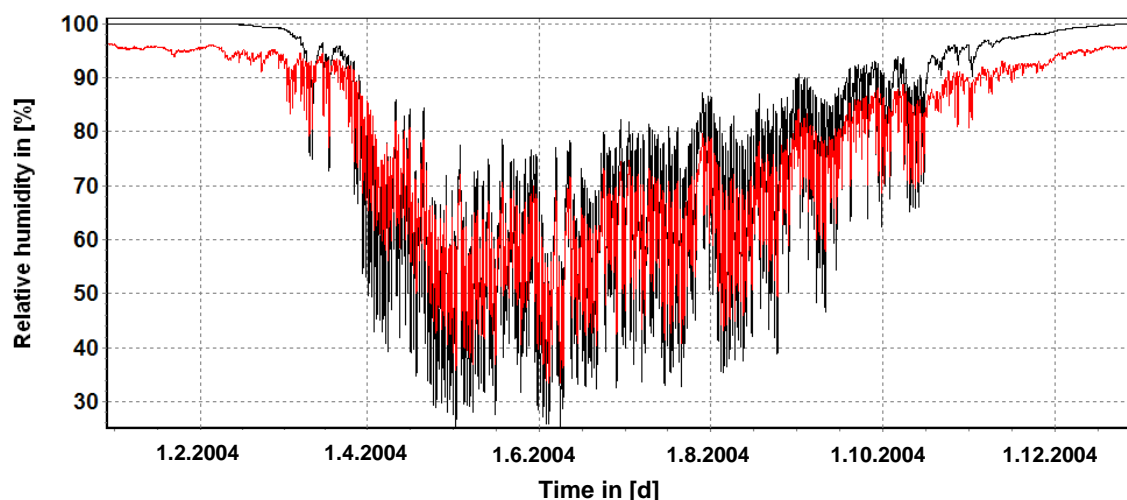


**Kuva 7.13.** Rakenteen ulko-osan lämmönvastuksen kasvattamisen vaikutus tasakaton TK1\_1 homeindeksin maksimiarvoon tarkastelupisteissä 3-7 Jokioisen 2004 ilmastossa, kun rakenteessa on ilmavuoto ja tuuletusvälin ilmanvaihtokerroin  $n=0,2$  1/h.

Kuva 7.13 osoittaa, että aluskatteen lämmönvastuksen kasvattaminen ei ole tässä tapauksessa tehokas tapa estää homeen kasvua rakenteessa. Homeindeksin maksimiarvo ei kaikissa tarkastelupisteissä laske alle yhden, vaikka aluskatteen lämmönvastus olisi  $3,3 \text{ m}^2\text{K/W}$ , joka vastaa esimerkiksi noin 80 mm polyuretaanieristettä. Kuvan esittämällä tavalla homeindeksin maksimiarvot jäävät jopa alhaisemmiksi rakenteessa, jossa ei ole lainkaan lämpöä eristävää aluskatetta, kuin rakenteessa, jossa aluskatteen lämmönvastus on noin  $0,4\text{--}0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Ilmanvaihtokerroin  $n=0,2$  1/h on siis aluskatteen lämmönvastuksesta riippumatta riittämätön tasakattorakenteelle, jossa on ilmavuoto. Tällöin kannattavin tapa parantaa ilmavuodollisen rakenteen toimintaa on aluskatteen lämmönvastuksen kasvattamisen sijaan kasvattaa tuuletusvälin ilmanvaihtuvuutta.

### 7.3 Hygroskooppisen materiaalin merkitys

Tässä tutkimuksessa yläpohjarakenteet mallinnettiin laskentaohjelmaan siten, että myös osa kantavista puurakenteista otettiin huomioon. Kun tuloksia verrattiin laskentamalleihin, joissa puurakenteita ei ollut huomioitu, havaittiin, että puumateriaalin mukanaolo muutti laskentatuloksia olennaisesti. Virheiden poissulkemiseksi mallinnuksessa kokeiltiin kolmea eri puumateriaalia ja niiden kaikkien vaikutus laskentatuloksiin oli samanlainen. Myös tasakattorakenteissa vesikatteen alustana oleva vaneri vaikutti samalla tavalla. Kuvassa 7.14 on harjakattorakenteen YP1 suhteellinen kosteus aluskatteen alapinnassa (tarkastelupiste 6) yhden vuoden ajalta, kun puurakenteet on sisällytetty laskentamalliin ja kun puurakenteet on jätetty pois.

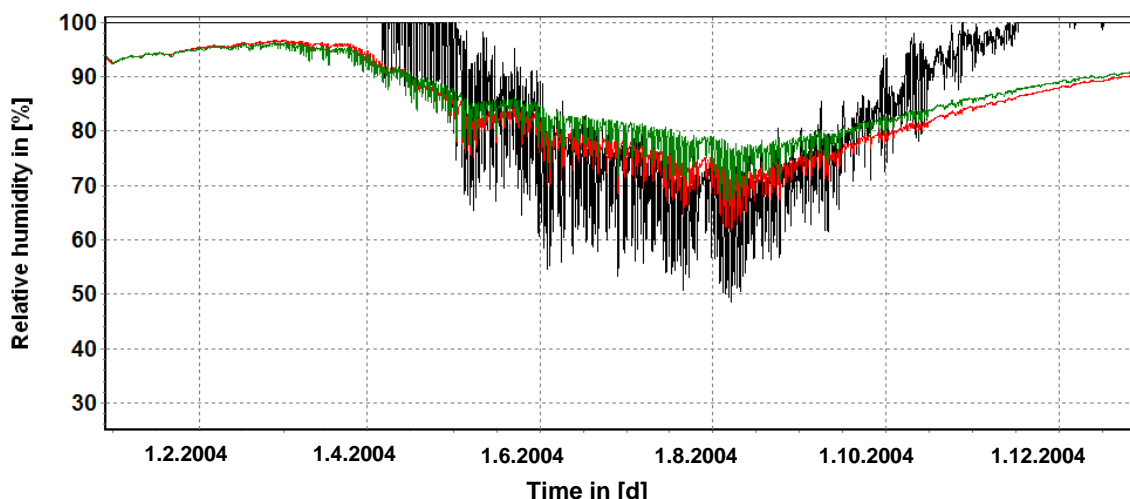


**Kuva 7.14.** Suhteellinen kosteus harjakattorakenteen YP1 tarkastelupisteessä 6, kun laskentamalli sisältää puurakenteet (punainen) ja kun laskentamalli ei sisällä puurakenteita (musta).

Kuvasta 7.14 nähdään, että rakenteessa olevat puuosat tasoittavat suhteellisen kosteuden vaihtelua. Tällöin myös homeen kasvuille suotuisia olosuhteita esiintyy vähemmän ja homeindeksin maksimiarvot jäävät alhaisemmiksi. Homeindeksin maksimiarvo tarkastelupisteessä 6 on puuosia sisältävässä rakenteessa 0,002 ja ilman puuosia 0,026 homehtumisherkkyysluokan ollessa molemmissa tapauksissa HHL3. Suhteellisen kosteuden keskiarvo tarkastelupisteessä 6 on vastaavasti puuosia sisältävässä rakenteessa 77,7 % RH ja ilman puuosia 79,7 % RH.

Kuvassa 7.15 on vastaavasti tasakattorakenteen TK1\_1 suhteellinen kosteus tuuletusvälin yläpinnassa (tarkastelupiste 7) yhden vuoden ajalta, kun kattoristikoiden puuosat on sisällytetty laskentamalliin ja kun puurakenteet on jätetty pois. Kuvaajan kolmas käyrä esittää suhteellisen kosteuden, kun tuuletusvälin yläpuolella olevan vanerin materiaaliominaisuuksia muutettiin siten, että sillä ei ollut lainkaan kosteudensitomiskapasiteettia, eikä rakenteessa ollut muita puuosia. Tarkastelupisteen homehtumisherkkyysluokka oli kaikissa kolmessa tapauksessa HHL2.





**Kuva 7.15.** Suhteellinen kosteus tasakattorakenteen TK1\_1 tarkastelupisteessä 7, kun laskentamalli sisältää kattoristikoiden puuosat (punainen), kun laskentamalli ei sisällä kattoristikoiden puurakenteita (vihreä) ja kun vanerilla ei ole kosteudensitomiskapasiteettia eikä rakenteessa ole muita puuosia (musta).

Kuvan 7.15 mukaan sekä vanerin että kattoristikoiden puuosien kosteuskapasiteetilla on vaikutusta rakenteen kosteusolosuhteisiin. Homeindeksin maksimiarvo tarkastelupisteessä 7 on ristikoiden puuosat sisältävässä rakenteessa 0,265 ja ilman puuosia 0,300. Kun vanerilla ei ole kosteuskapasiteettia, saadaan homeindeksin maksimiarvoksi 1,220. Suhteellisen kosteuden keskiarvot tarkastelupisteessä 6 ovat vastaavasti 85,9 % RH, 84,2 % RH ja 88,0 % RH.

Puumateriaalin rakenteen suhteellista kosteutta tasoittava vaikutus perustuu puun hygroskooppisuuteen, eli kykyyn sitoa itseensä kosteutta ilmasta ja luovuttaa sitä takaisin ilmaan. Tasoittava vaikutus näyttäisi olevan sitä merkittävämpi mitä suurempi pinta-ala hygroskooppista materiaalia rakenteessa on kontaktissa ilman kanssa. Tästä johtuen vesikattovaneri tasoittaa suhteellisen kosteuden vaihtelua voimakkaammin kuin kattoristikoiden puuosat.

## 7.4 Muunnettu Rayleighin luku

Muunnettua Rayleighin lukua tarkastelemalla pyritään hallitsemaan sisäisen konvektion esiintymistä yläpohjarakenteiden ilmaa läpäisevässä lämmöneristekerroksessa. Tässä tutkimuksessa ainoa ilmaa läpäisevä lämmöneristemateriaali oli puukuitueriste, jossa tapahtuvaa sisäistä konvektiota tarkasteltiin käsin laskien. Puukuitueristeen ilmaläpäisevyytenä käytettiin arvoja, jotka perustuvat sekä eristevalmistajan ilmoittamiin materiaaliominaisuuksiin että VTT:llä ja TTY:llä aiemmin tehtyihin ilmanläpäisevyyssmittauksiin.

Laskennassa käytetyt puukuitueristeiden ilmanläpäisevyyden arvot olivat seuraavat:

- sideaineeton puhallettu puukuitueriste  $2,30 \times 10^{-4} \text{ (m}^3\text{/(msPa))}$
- sideaineellinen puhallettu puukuitueriste  $5,00 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{/(msPa))}$
- puukuitueristelevy  $1,36 \times 10^{-4} \text{ (m}^3\text{/(msPa))}$

Laskennassa käytetty levymäisen puukuitueristeen ilmanläpäisevyys on arvioitu eristevalmistajan (Ekovilla) ilmoittaman levyeristeen tiheyden ( $32\text{--}42 \text{ kg/m}^3$ ) ja puhallettavan puukuitueristeen samaa tiheysarvoa vastaavan ilmanläpäisevyyden ( $1,5\text{--}1,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3\text{/(msPa)}$ ) perusteella, koska levyeristeen ilmanläpäisevyysarvoa ei ollut saatavissa.

Lämmöneristeyhdistelmille, jotka koostuvat puukuitueristelevystä ja puhalletusta puukuitueristeestä, muunnettu Rayleighin luku laskettiin kaavalla (3.12) käyttäen koko eristekerroksen ilmanläpäisevyytenä osakerrosten ilmanläpäisevyyksien keskiarvoa painotettuna osakerrosten paksuuksilla. Vastaavasti koko eristekerroksen lämmönjohtavuutena käytettiin osakerrosten lämmönjohtavuuksien keskiarvoa painotettuna osakerrosten paksuuksilla.

Taulukossa 7.17 on esitetty erilaisilla lämmöneristemateriaalien yhdistelmillä saavutettavat muunnetun Rayleighin luvun arvot. Taulukkoon on merkitty lihavoituna kokonaan puhallusvillasta toteutettujen 500 mm ja 400 mm lämmöneristekerrosten muunnetut Rayleighin luvut. Lihavoitujen rivien alla on esitetty erilaisia vaihtoehtoja toteuttaa lämmöneristävyydeltään vastaava rakenne yhdistämällä puhallusvillaa ja puukuitu- tai polyuretaanilevyeristettä. Puhalluseristepaksuudet on pyöristetty 50 mm:n tarkkuuteen. Taulukon vasemmassa sarakkeessa on ilmoitettu sideaineettoman puhalletun puukuitueristeen tulokset ja oikeassa sarakkeessa sideaineellisen puhalletun puukuitueristeen tulokset, koska sideaineellisen ja sideaineettoman puhallusvillan ilmanläpäisevyysarvot eroavat toisistaan. Sideaineettoman puhalletun puukuitueristeen maksimipuhallustiheys on CE-hyväksynnän mukaan  $36 \text{ kg/m}^3$  ja sideaineellisen  $65 \text{ kg/m}^3$  (ETA-09/0081 2010).

**Taulukko 7.17.** Erilaisten lämmöneristeyhdistelmien muunnetut Rayleighin luvut.

| lämmöneristeyhdistelmä  | Ra <sub>m</sub>                         |  |
|---|---|--|
|   | Sideaineeton<br>(36 kg/m <sup>3</sup> ) | Sideaineellinen<br>(65 kg/m <sup>3</sup> ) |
| <b>puhallettu puukuitueriste 500 mm</b>                         | <b>7.25</b>                             | <b>1.58</b>                                |
| puukuitueristelevy 100 mm +<br>puhallettu puukuitueriste 400 mm | 6.65                                    | -  |
| puukuitueristelevy 400 mm +<br>puhallettu puukuitueriste 100 mm | 4.88                                    | -  |
| polyuretaanilevy 60 mm +<br>puhallettu puukuitueriste 400 mm    | 4.64                                    | -  |
| <b>puhallettu puukuitueriste 400 mm</b>                         | <b>5.80</b>                             | <b>1.26</b>                                |
| puukuitueristelevy 100 mm +<br>puhallettu puukuitueriste 300 mm | 5.20                                    | -  |
| puukuitueristelevy 150 mm +<br>puhallettu puukuitueriste 250 mm | 4.91                                    | -  |
| PUR-levy 30 mm +<br>puhallettu puukuitueriste 350 mm            | 4.44                                    | -  |

Taulukosta 7.17 nähdään, että paksummat lämmöneristekerrokset tuottavat korkeamman muunnetun Rayleighin luvun arvon kuin ohuimmat kerrokset. Siis mitä paksumpi lämmöneristekerros rakenteessa on, sitä voimakkaampaa on rakenteessa esiintyvä sisäinen konvektio. Taulukosta on nähtävissä myös, että sideaineellista puhallusvillaä käytämällä voidaan alittaa muunnetulle Rayleighin luvulle julkaisussa Vinha et al. (2013) annettu yläraja-arvo ( $Ra_m \leq 5,0$ ) selvästi sekä 400 mm:n että 500 mm:n eristepaksuudella. Sen sijaan sideaineeton puhallusvilla ei sellaisenaan täytä asetettua kriteeriä kummallakaan eristepaksuudella.

Osa sideaineettomasta puhallusvillasta on korvattava levymäisellä, vähemmän ilmaa läpäisevällä lämmöneristeellä, jotta rakenteet täyttäisivät asetetun kriteerin. Kun haluttu kokonaiseristepaksuus on 400 mm, voidaan se toteuttaa 150 mm:n puukuitueristelevyllä ja 250 mm:n kerroksella puhallettua puukuitueristettä, jolloin muunnetuksi Rayleighin luvuksi saadaan 4,91 ( $<5,0$ ). Toinen vaihtoehto on muodostaa lämmöneristekerros 30 mm:n polyuretaanilevystä ja 350 mm:n kerroksesta puhallettua puukuitueristettä, jolloin muunnettu Rayleighin luku on 4,44.

500 mm lämmöneristepaksuuden tapauksessa puhalluseristeen osittainen korvaaminen puukuitueristelevyllä ei enää ole toimiva ratkaisu, sillä asetetun kriteerin täyttymiseksi levyeristeen paksuuden tulisi olla 400 mm. Näin paksun levyeristeen asentaminen ristikkorakenteeseen yläpohjaan ei ole järkevää työtekniisistä syistä. Helpompi vaihtoehto on korvata 500 mm:n kerros puhallettua puukuitueristettä 60 mm:n polyuretaanilevyllä ja 400 mm:n kerroksella puhallettua puukuitueristettä, jolloin muunnetun Rayleighin luvun arvoksi muodostuu 4,64. Polyuretaanilevy on sijoitettava yläpohjarakenteessa

puhallusvillan alapuolelle, jotta rakenteen vesihöyrynvastus pienenee rakenteen ulko-osaa kohti.

## 7.5 Laskentatulosten vertailu

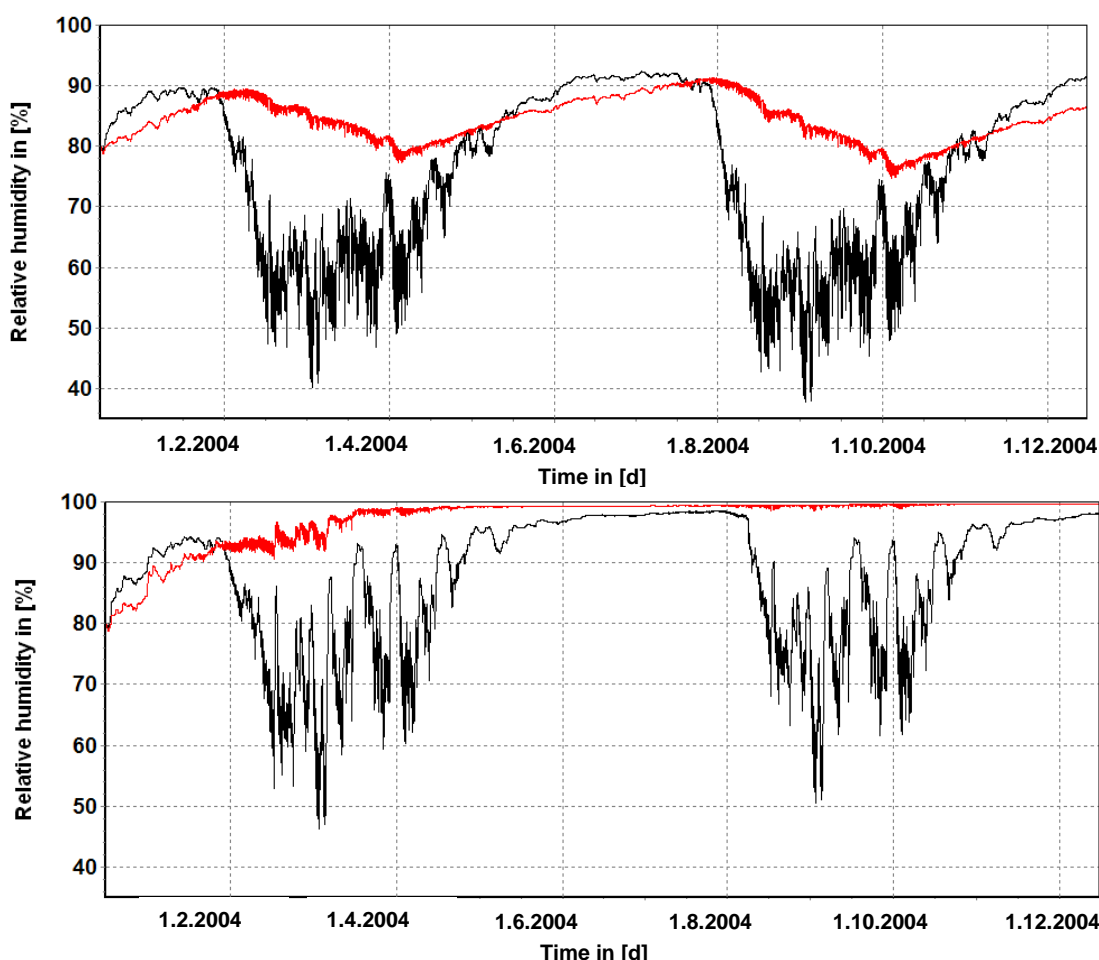
Luvussa 7.1 tarkasteltiin homehtumisriskiä ja kosteuden kondensoitumisriskiä erilaisissa tuulettuvissa puurakenteisissa yläpohjissa. Eri rakenteiden laskentatulosten välillä on havaittavissa yhteneväisyyksiä, joita käsitellään seuraavaksi.

Kaikilla tarkastelluilla harjakattorakenteilla homeindeksin maksimi-arvot olivat vuoden 2050 ilmastossa korkeammat kuin vuoden 2004 ilmastossa. Vastaavasti myös suhteellisen kosteuden maksimi-arvot olivat harjakatoilla korkeammat tulevaisuuden ilmastossa. Tasakattorakenteilla homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot kasvoivat vuoden 2050 ilmastossa pääsääntöisesti rakenteen sisäpinnasta lämmöneristekerroksen ulkopintaan ulottuvalla alueella. Sen sijaan lähellä tasakattorakenteiden ulko-osaa homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot pienenivät tulevaisuuden ilmastoon siirryttäessä hiukan, kun lämmöneristemateriaalina oli puukuitueriste ja kasvoivat hiukan, kun rakenteessa oli polyuretaanieriste. Ilmastonmuutoksen vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan oli kuitenkin harjakatoilla merkittävämpi kuin tasakatoilla, mikä selittyy harjakattorakenteiden suuremmalla ilmanvaihtuvuudella. Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa harjakatto- ja tasakattorakenteisiin samalla tavalla, mutta ilmaston muuttuminen kosteammaksi heikentää olosuhteita enemmän harjakatossa, koska sen tuuletustilan kautta kulkee aikayksikössä suurempi määrä kosteutta sisältävää ulkoilmaa kuin tasakaton matalamman tuuletusvälin kautta.

Kaikkia yläpohjarakenteita tarkasteltiin ideaalisina, ehjinä rakenteina sekä tilanteessa, jossa rakenteessa esiintyi kosteusvuoto joko sisäilmasta (ilmavuoto) tai ulkoilmasta (sadevuoto). Molempien vuototyyppien havaittiin heikentävän yläpohjarakenteiden kosteusteknistä toimintaa. Kaikissa rakenteissa ilmavuoto kasvatti huomattavasti suhteellisen kosteuden maksimi-arvoa lähellä rakenteen sisäpintaa. Harjakatoilla ilmavuoto aiheutti suhteellisen kosteuden raja-arvon 98 % RH ylittymisen ainoastaan lämmöneristeen yläpinnassa sijaitsevassa tarkastelupisteessä ja homeindeksikriteeri  $M_{\max} \leq 1,0$  ei ylittynyt missään tarkastelupisteessä. Tasakattojen ilmavuototarkasteluissa sen sijaan suhteellinen kosteus ei ylittänyt asetettua raja-arvoa yhdessäkään tarkastelupisteessä, mutta homeindeksi sai korkeimmillaan arvon  $M_{\max} = 2,2$ . Harjakatto- ja tasakattorakenne erosivat toisistaan siten, että tasakattorakenteessa puukuitueristeen yläpuolella oli ilmatiivis tuulensuojalevy, johon ilmavuototarkastelua varten oli mallinnettava rako. Tällöin tasakattorakenteissa sisäilmasta tuleva vuotoilma virtasi kapealta alueelta eristekerroksen läpi. Harjakattorakenteessa tuulensuojalevyä ei ollut lainkaan, jolloin höyrynsulkukalvoon mallinnetusta raosta tuleva vuotoilmavirta hajaantui lämmöneristekerrokseen tasaisemmin. Ilmanvaihdon määrää varioitaessa havaittiin, että kaikissa tarkastelluissa yläpohjarakenteissa suurempi ilmanvaihtuvuus auttoi tuulettamaan sisäilmasta rakentee-

seen vuotavan kosteuden pois rakenteesta, jolloin homeen kasvulle tai kosteuden tiivistymiselle otollisia olosuhteita ei muodostunut.

Sadevuototarkasteluissa homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot nousivat hyvin korkeiksi sekä harjakatto- että tasakattorakenteilla. Sadevuoto heikensi kaikkien rakenteiden toimintaa niin paljon, että rakenteita ei testilaskelmien perusteella olisi saatu toimiviksi edes tuuletusta lisäämällä. Asetetut raja-arvot  $M_{\max}$  ja  $RH_{\max}$  ylittyivät kaikissa yläpohjarakenteissa lämmöneristekerroksen ulkopinnan yläpuolella olevissa tarkastelupisteissä. Kuvassa 7.16 on esitetty suhteellinen kosteus harjakatto- ja tasakattorakenteen tuuletustilan yläosassa, kun rakenteissa on sadevuoto. Vertailun vuoksi samassa kuvassa on esitetty myös vastaavien vuotamattomien rakenteiden suhteellisen kosteuden kuvaajat samassa tarkastelupisteessä. Kuvasta nähdään, että vuotavan tasakattorakenteen suhteellinen kosteus pysyy jatkuvasti korkeana kun taas harjakattorakenne kuivuu kesän aikana. Tämä johtuu jo aiemmin mainitusta erosta harjakatto- ja tasakattorakenteiden ilmanvaihtuvuudessa.



**Kuva 7.16.** Harjakattorakenteen YP1 (musta) ja tasakattorakenteen TK1\_1 (punainen) suhteellisen kosteuden kuvaajat tuuletustilan yläosassa, kun rakenteet ovat vuotamattomia (ylärivi) ja kun molemmissa rakenteissa on sadevuoto (alarivi). Tarkasteluajanjakson pituus on kaksi vuotta ja suhteellinen kosteus tarkastelun alkuhetkellä on 80 % RH.

Harjakattorakennetta tutkittiin kahdella lämmöneristepaksuudella. Lämmöneristemateriaalina oli puhallettu puukuitueriste ja eristepaksuuksina 400 mm ja 500 mm. Pienempi lämmöneristepaksuus tuotti vuotamattomalla rakenteella hiukan korkeampia homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvoja kuin suurempi eristepaksuus. Erot olivat kuitenkin varsin pieniä. Puukuitueriste on hygroskooppinen materiaali, joten mahdollisesti paksumman lämmöneristekerroksen suurempi kosteuskapasiteetti parantaa rakenteen kosteusteknistä toimintaa silloin, kun rakenteessa ei esiinny kosteusvuotoja. Sadevuototarkasteluissa 400 mm:n lämmöneristepaksuus tuotti vähän pienemmän homeindeksin maksimiarvon kuin 500 mm:n eristepaksuus. Selityksenä lieenee se, että ohuempi lämmöneristekerros pystyy kuivumaan paksua kerrosta nopeammin olosuhteiden muuttuessa kuivumiselle otollisiksi. Erot olivat tässäkin tapauksessa hyvin pieniä.

Tasakatoille laskentatarkasteluja tehtiin käyttäen lämmöneristemateriaalina puhallettua puukuitueristettä ja polyuretaanilevyeristettä. Polyuretaanieriste tuotti vuotamattomalla rakenteella tuuletusvälissä pienemmät homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot kuin puukuitueriste, kun eristekerrosten lämmönvastukset olivat yhtä suuret ja rakenteen ilmanvaihtuvuus oli hyvin pieni. Polyuretaanieristeellä toteutetun rakenteen sisäpinnan ja tuuletusvälin välisen osuuden vesihöyrynvastus on suurempi kuin puukuitueristeellä toteutetun rakenteen, joten sisäilmasta siirtyy polyuretaanieristettä käytettäessä diffuusiolla vähemmän kosteutta rakenteeseen. Lisäksi polyuretaanieristeen yläpinta mallinnettiin diffuusiotiiviinä, jolloin eristekerros ei sitonut eikä luovuttanut kosteutta tuuletusvälin ilmaan. Puukuitueriste sen sijaan päästi lävitseen sisäilmasta diffuusiolla siirtyvää kosteutta, minkä lisäksi se voi varastoida kosteutta tuuletusilmasta.

Kun yläpohjan ilmanvaihtuvuus on hyvin pieni eikä rakenteessa ole kosteusvuotoja, on sisätiloista rakenteeseen diffuusiolla siirtyvän kosteuden määrä merkittävin tekijä rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. Sisäilma on silloin suurin kosteuslähde. Kun ilmanvaihtuvuutta kasvatetaan, sisäilmasta tulevan kosteuden suhteellinen vaikutus vähenee ja tuuletustilassa virtaavasta ulkoilmasta tulee pääasiallinen kosteuslähde. Siten erityisesti rakenteissa, joissa ilmanvaihtuvuus on suurehko, on puukuitueristeen suhteellisen kosteuden vaihtelua tasaavasta vaikutuksesta hyötyä rakenteen toiminnan kannalta. Puukuitueriste pystyy kostealla säällä sitomaan itseensä ulkoilman mukana tulevaa kosteutta ilman, että siitä on rakenteen haittaa rakenteen toiminnalle, ja luovuttamaan kosteutta pois sään muuttuttua kuivemmaksi. Vertailulaskelmissa todettiin, että suurella ilmanvaihtuvuudella puukuitueriste tuottaa alhaisemman homeindeksin maksimiarvon kuin polyuretaanieriste.

Tutkimuksessa tarkasteltiin kolmea erilaista tasakattorakennetta, joiden tulokset eivät ole keskenään suoraan vertailukelpoisia. Viherkattorakenne tuotti alhaisempia homeindeksin maksimiarvoja kuin tavallinen tasakattorakenne, mutta syynä ei ollut viherkerroksen vaikutus rakenteen ulko-osan lämmöneristävyys. Ero johtui pääosin tavallisen tasakattorakenteen ja viherkattorakenteen laskentamallien keskenään erisuurista tuule-

tusilman tilavuusvirroista. Kun molempien rakenteiden ilmanvaihtokertoimenä käytettiin  $n=0,2$  1/h ja tuuletusvälin korkeus oli tavallisella tasakatolla 200 mm ja viherkatolla 300 mm, olivat ilman tilavuusvirrat vastaavasti  $0,04 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  ja  $0,06 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Viherkaton tuuletusvälin kautta kulki siis 50 % enemmän tuuletusilmaa tavalliseen tasakattoon verrattuna. Ilmanvaihtuvuuden varioinnin havaittiin vaikuttavan homeindeksin arvoihin hyvin voimakkaasti kaikissa laskentatarkasteluissa siten, että suurempi tuuletusilman tilavuusvirta paransi rakenteiden toimintaa tilavuusvirran ollessa välillä  $0 \dots 0,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ . Tilavuusvirran ollessa tätä suurempi rakenteen toiminta sitä vastoin heikkeni. Lisäksi viherkattorakenteen eristekerroksena oli 450 mm puukuitueristettä ( $R=11,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ ), kun taas tavallisen tasakattorakenteen eristepaksuus oli 500 mm ( $R=12,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ ).

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös auringon säteilyn vaikutusta yläpohjarakenteiden toimintaan. Kaikki edellä esitetyt tulokset koskevat aurinkoisella paikalla sijaitsevia yläpohjia, joita auringon suora säteily pääsee lämmittämään. On oletettavaa, että suora säteily vaikuttaa yläpohjarakenteiden toimintaa parantavasti. Tämän vuoksi yhtä harjakattorakennetta ja yhtä tasakattorakennetta tarkasteltiin myös siten, että suora säteily jätettiin pois laskentamallista. Tällä tavalla mallinnettiin täysin varjossa olevaa yläpohjaa. Taulukossa 7.18 on esitetty varjossa olevan harjakattorakenteen YP1 homeindeksin maksimi-arvot kaikissa tarkastelupisteissä kahdella eri ilmanvaihtuvuudella Jokioisen 2004 testivuoden ilmastossa. Vertailun vuoksi samaan taulukkoon on liitetty jo aiemmin esitetyt vastaavan auringossa olevan rakenteen tulokset. Ilmanvaihtomäärä on merkitty taulukkoon yksiköissä 1/h ja  $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ .

**Taulukko 7.18.** Aurinkoisella ja varjoisalla paikalla sijaitsevan harjakattorakenteen YP1 homeindeksin maksimi-arvot tarkastelupisteissä 1-6 Jokioisen 2004 testivuoden ilmastossa kahdella eri ilmanvaihtuvuudella.

| n [1/h]<br>n*d [ $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ ] | auringossa |       | varjossa |       |
|--|------------|-------|----------|-------|
|  | 0.04       | 0.5   | 0.04     | 0.5   |
| 1  | 0          | 0     | 0        | 0     |
| 2  | 0          | 0     | 0        | 0     |
| 3  | 2.606      | 0.092 | 4.431    | 0.290 |
| 4  | 1.579      | 0.016 | 3.895    | 0.101 |
| 5  | 1.525      | 0.016 | 3.998    | 0.057 |
| 6  | 0.059      | 0.002 | 0.178    | 0.005 |

Ilmanvaihtuvuuden ollessa hyvin pieni vaikuttaa suoran säteilyn puuttuminen rakenteen toimintaa heikentävästi. Homeindeksi saa tällöin varjossa olevassa yläpohjassa arvoja 3,9–4,4, kun ne auringossa olevalla rakenteella ovat vastaavasti noin 1,5–2,5. Yläpohjan ilmanvaihtuvuuden ollessa riittämätön on homeen kasvun riski siis suurempi varjossa olevassa katossa tai katon osassa kuin auringossa olevassa. Kun ilmanvaihtuvuutta kasvatetaan, auringossa ja varjossa olevien rakenteiden toiminnan väliset erot pienenevät.

Taulukosta 7.18 nähdään, että ilmanvaihtokertoimen ollessa 0,5 1/h myös varjossa oleva harjakattorakenne YP1 täyttää homeindeksin maksimiarvolle asetetun kriteerin selvästi. Siten ilmanvaihtokerroin 0,5 1/h on turvallinen riippumatta siitä, kuinka paljon suoraa auringonsäteilyä osuu kattorakenteeseen. Taulukossa 7.19 on vastaavat tulokset auringossa ja varjossa olevalle tasakattorakenteelle TK1\_1.

**Taulukko 7.19.** Aurinkoisella ja varjoisalla paikalla sijaitsevan tasakattorakenteen TK1\_1 homeindeksin maksimiarvot tarkastelupisteissä 1-7 Jokioisen 2004 testivuoden ilmastossa kahdella eri ilmanvaihtuvuudella.

| n [1/h]<br>n*d [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)] | auringossa  |            | varjossa    |            |
|---|-------------|------------|-------------|------------|
|   | 0.2<br>0.04 | 2.5<br>0.5 | 0.2<br>0.04 | 2.5<br>0.5 |
| 1   | 0           | 0          | 0           | 0          |
| 2   | 0           | 0          | 0           | 0          |
| 3   | 0.608       | 0.007      | 1.879       | 0.017      |
| 4   | 0.715       | 0.009      | 2.203       | 0.020      |
| 5   | 0.734       | 0.009      | 2.303       | 0.020      |
| 6   | 0.781       | 0.006      | 2.505       | 0.024      |
| 7   | 0.309       | 0.005      | 1.030       | 0.010      |

Pienellä ilmanvaihtuvuudella homeindeksi saa varjossa olevassa tasakatossa taulukon 7.19 mukaisesti arvoja 1,9–2,5, mikä tarkoittaa, että rakenne ei täytä asetettuja kriteereitä. Ilmanvaihdon lisääminen kuitenkin parantaa rakenteen toimintaa siten, että ilmanvaihtokertoimen ollessa 2,5 toimivat auringossa ja varjossa olevat katot lähes yhtä hyvin eikä homeen kasvua esiinny riippumatta suoran auringon säteilyn määrästä. Tasakaton TK1\_1 ilmanvaihtokerroin 2,5 vastaa tuuletusilman tilavuusvirran osalta harjakaton YP1 ilmanvaihtokerrointa 0,5, sillä tasakaton tuuletusvälin korkeus (200 mm) on viidesosa harjakaton tuuletustilan korkeudesta (1000 mm). Siten tuuletusilman tilavuusvirta 0,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h), joka tarkoittaa 0,5 m<sup>3</sup> ulkoilmaa yhtä katoneliötä kohti tunnissa, olisi sopiva ilmanvaihtuvuus sekä harjakatolle että tasakatolle.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat pääosin yhteneviä luvussa 2.3 esitettyjen FRAME-tutkimuksen yläpohjarakenteita koskevien tulosten kanssa. On kuitenkin huomattava, että FRAME:n tulokset koskevat ainoastaan harjakattoista yläpohjarakennetta, eivätkä ne sisällä lainkaan kosteusvuototarkasteluja. Myös FRAME:n laskentamallin materiaalit ja materiaalikerrokset eroavat osittain tämän tutkimuksen laskentamalleista. Molemmissa tutkimuksissa ilmastomuutoksen todettiin kuitenkin lisäävän homeen kasvun riskiä yläpohjan tuuletustilassa. FRAME:n tuloksissa todettiin yläpohjan ilmanvaihtuvuuden vaikutuksen olevan suuri rakenteen toiminnan kannalta ja arvioitiin suuremman ilmanvaihtuvuuden olevan edullinen silloin, kun yläpohjaan kohdistuu ylimääräistä kosteuskuormitusta vuotojen seurauksena. Sama havainto on tehtävissä myös tämän tutkimuksen tuloksista, joskin myös liian suuri ilmanvaihtuvuus heikentää rakenteen toimintaa. Tarkasteltujen harjakattojen ja tasakattojen tulokset erosivat tässä tutki-



mukksessa toisistaan sekä ideaalisten että vuotavien rakenteiden tapauksessa, ja suurimman eron rakenteiden välillä muodostivat nimenomaan tuuletustilan koko ja rakenteen ilmanvaihtuvuus.

FRAME:n tulosten mukaan yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa voidaan parantaa huolehtimalla rakenteen ilmatiivyydestä ja lisäämällä tarvittaessa ulkopinnan lämmönvastusta. Myös tässä tutkimuksessa havaittiin, että ilmavuodot sisätilasta rakenteeseen heikentävät rakenteen kosteusteknistä toimintaa. Niitä rakenteita, jotka eivät täyttäneet asetettuja homeen kasvun ja kosteuden kondensoitumisen kriteereitä, voitiin parantaa lisäämällä lämmöneristettä tuuletustilan ulkopuolelle. Rakenteen ulkoosan lämmönvastuksen kasvattamisesta ei kuitenkaan ollut merkittävää hyötyä, jos rakenteessa oli ilmavuoto ja tuuletusilman tilavuusvirta oli samanaikaisesti hyvin pieni. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella vesihöyrytiiviimpi polyuretaanilämmöneriste tuotti tasakatoilla pienempiä homeindeksin maksimiarvoja tuuletusvälissä. Tämä havainto tukee FRAME:n tuloksia, joissa todettiin, että rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastusta kasvattamalla voitiin pienentää yläpohjan tuuletustilan yläosan homeindeksiä sitä enemmän, mitä vähäisempi oli tuuletustilan ilmanvaihtuvuus. Edellä käsitelty yläpohjan hygroskooppisen lämmöneristemateriaalin suuren kosteuskapasiteetin edullinen vaikutus rakenteen toiminnalle on myös nostettu esiin FRAME-tutkimuksen loppuraportissa. Vaikutuksen arveltiin johtuvan suuren kosteuskapasiteetin omaavan lämmöneristekerroksen kyvystä tasata yläpohjan olosuhteiden vuorokautista vaihtelua.

FRAME:n mukaan nykyisillä puhalluseristemateriaaleilla merkittävää sisäistä konvektiota alkaa esiintyä, kun eristepaksuus ylittää 250–300 mm. Sisäisen konvektiota voidaan hillitä esimerkiksi lisäämällä eristeen joukkoon sideainetta tai korvaamalla osa puhalluseristeestä levyeristeellä, jonka ilmanläpäisevyys on pienempi kuin puhallusvillalla. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että sideaineettomalla puhalletulla puukuitueristeellä ei voida täyttää muunnetulle Rayleighin luvulle FRAME-tutkimuksen tuloksissa annettua kriteeriä, kun eristekerroksen paksuus on 400 tai 500 mm. Sen sijaan sideaineellista puhallusvillaa käyttämällä asetettu yläraja-arvo alittuu selvästi eikä sisäisestä konvektiosta siten aiheudu haittaa rakenteen toiminnalle. Sisäisen konvektion haitallinen vaikutus saatiin poistettua myös muodostamalla yläpohjan lämmöneristekerros levyeristettä ja puhalluseristettä yhdistämällä.

## 7.6 Virhearvio

Yläpohjarakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta on monimutkainen kokonaisuus, johon vaikuttavat hyvin monet ilmiöt ja tekijät. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa kaikki lämmön ja kosteuden siirtymistavat, todellista rakennetta ympäröivät olosuhteet vaihteluineen, rakennusmateriaalien lukuisat ominaisuudet ja todellisten rakenteiden epäideaalisuudet, kuten kylmäsilat, liitokset ja vuotokohdat. Kaikkia näitä muuttujia on vaikea huomioida tutkittaessa rakenteita laskennallisesti. Tässä tutkimuksessa tarkastel-

tiin yksittäisiä yläpohjarakenteita käyttäen tiettyjä materiaaliominaisuuksia ja määrättyjä ulkoilman olosuhteita. Rakenteiden välisiä liitoskohtia tai muita perusrakennetyypistä poikkeavia kohtia ei mallinnettu. Siten edellä esitetyt yläpohjarakenteiden laskennalliseen mallinnukseen perustuvat tulokset antavat arvion tutkittujen rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisestä toiminnasta mutta eivät välttämättä päde sellaisenaan muille yläpohjarakenteille tai toisenlaisissa olosuhteissa oleville rakenteille.

Tutkimuksessa rakenteen ulkopinnan olosuhteina käytettyjen rakennusfysikaalisten testivuosi- osalta on huomioitava, että ne eivät yleensä kuvaa rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta kaikkein kriittisintä ilmastoa. Tämä tarkoittaa sitä, että jonakin vuonna todellinen ilmasto voi olla laskennassa käytettyä testivuoden ilmastoa hankalampi rakenteen toimivuuden kannalta. Lisäksi todellisen rakennuksen ympärillä vallitseva mikroilmasto, johon vaikuttavat esimerkiksi lähellä olevat muut rakennukset ja kasvillisuus, voi paikallisesti heikentää olosuhteita merkittävästi. Testivuodet eivät huomioi mikroilmastoa vaan kuvaavat olosuhteita, jotka vaikuttavat avonaisella, tasaisella paikalla sijaitsevaan rakennukseen. (Vinha et al. 2013) Laskentatulosten yleistettävyyttä rajoittaa myös yläpohjarakenteiden tuuletustilan ilmanvaihtuvuuden vaikutus rakenteen toimintaan. Todellisessa rakenteessa esiintyvä ilmanvaihtuvuus ei ole vakio ja sen vaihtelu voi joissakin tapauksissa olla merkittävää. Ilmanvaihtuvuus riippuu esimerkiksi rakennuspaikan tuulisuudesta, tuuletustilan muodosta ja mitoista sekä mahdollisista tuulettumista haittaavista rakenteellisista esteistä.

Tutkimuksessa käytetyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän ohella myös laskentaohjelma sekä VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämä parannettu homemalli sisältävät erilaisia yksinkertaistuksia, joiden vuoksi laskennan tulokset eivät välttämättä kaikissa tapauksissa kuvaa täydellisesti todellisen yläpohjarakenteen toimintaa. Parannetussa homemallissa homeen kasvun biologinen ilmiö on yksinkertaistettu matemaattiseksi malliksi, joten malli kertoo ainoastaan homeen kasvun riskin suuruusluokasta eikä kuvaa täydellisesti homeen biologista kasvukäyrää. Kuten aikaisemmin luvussa 6.2 todettiin, Delphin 5.8.1 -ohjelmassa ei voida huomioida esimerkiksi kosteuden painovoimaista siirtymistä eikä rakenteita ole mahdollista mallintaa aidosti kolmiulotteisina. Kun tarkasteltavat rakenteet on mallinnettava kaksiulotteisina, on niitä joissakin tapauksissa yksinkertaistettava. Kosteuden painovoimaisen siirtymisen puuttuminen laskentaohjelmasta puolestaan tarkoittaa sitä, että esimerkiksi sadevuotoja ei voida mallintaa samalla tavalla kuin ne yläpohjarakenteissa todellisuudessa tapahtuvat.

Tämän tutkimuksen perustana oli muutamaa vuotta aikaisemmin suoritettu FRAME-tutkimus, jossa yläpohjarakenteiden laskennalliset tarkastelut tehtiin Delphin-ohjelman versiolla 5.7.3. Tässä tutkimuksessa käytettiin saman laskentaohjelman uudempaa versiota 5.8.1. Tutkimuksen aikana havaittiin, että uudet tulokset eivät kaikilta osin vastanneet FRAME:n tuloksia, jolloin heräsi kysymys siitä, tuottavatko nämä kaksi laskentaohjelman versiota keskenään erilaisia tuloksia. Tätä asiaa tutkittiin luomalla muutamista

yläpohjarakenteista identtiset laskentamallit molemmilla laskentaohjelman versioilla ja vertaamalla niistä saatuja tuloksia keskenään. Taulukossa 7.20 on esitetty molemmista laskentaohjelmista saadut homeindeksin maksimiarvot yhdelle harjakattorakenteelle (YP1) ja yhdelle tasakattorakenteelle (TK1\_1). Nämä rakenteet eivät ole täysin samat kuin luvussa 7.1 käsitellyt rakenteet YP1 ja TK1\_1. Ohjelmaversiossa 5.7.3 ei ollut mahdollista käyttää höyrynsulkumateriaalille suhteellisen kosteuden funktiona muuttuvaa diffuusiovastuskerrointa, joten tässä vertailussa höyrynsulkuna on käytetty tavallista höyrynsulkumuovia molemmissa ohjelmaversioissa. Lisäksi tasakattorakenteesta on tässä vertailussa jätetty tuulensuojalevy mallintamatta yksinkertaistuksen vuoksi, joten taulukkoon ei ole merkitty tarkastelupisteen 4 homeindeksin maksimiarvoa. Laskennassa käytettiin Jokioisen 2004 testivuoden ilmastoa.

**Taulukko 7.20.** Harjakaton YP1 ja tasakaton TK1\_1 homeindeksin maksimiarvot eri tarkastelupisteissä laskentaohjelmilla Delphin 5.7.3 ja Delphin 5.8.1 laskettuna Jokioisen 2004 ilmastossa.

| YP1 | 5.7.3 | 5.8.1 |
|-----|-------|-------|
| 1   | 0     | 0     |
| 2   | 0     | 0     |
| 3   | 0.077 | 0.078 |
| 4   | 0.009 | 0.012 |
| 5   | 0.012 | 0.015 |

| TK1_1 | 5.7.3 | 5.8.1 |
|-------|-------|-------|
| 1     | 0     | 0     |
| 2     | 0     | 0     |
| 3     | 0.379 | 0.430 |
| 5     | 0.440 | 0.486 |
| 6     | 0.653 | 0.564 |

Taulukon 7.20 perusteella voidaan päätellä, että laskentaohjelman versiolla ei ollut merkitystä tulosten kannalta. Ohjelmaversioiden väliset erot osoittautuivat niin pieniksi, että FRAME:n ja tämän tutkimuksen tulosten väliset eroavaisuudet johtunevat valtaosin rakennemalleissa ja materiaaliominaisuuksissa olevista eroista, joita on käsitelty edellä luvuissa 2.3, 6.3 ja 7.5.

Tämän tutkimuksen laskelmat on tehty parhaaseen olemassa olevaan tietämykseen perustuen ja käyttäen kehittyneintä tällä hetkellä käytettävissä olevaa rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmää. Lisävarmuutta tutkittujen rakenteiden toimintaan on kuitenkin saatu asettamalla käytettyjen toimintakriteerien raja-arvot riittävän tiukoiksi ja varmistamalla, että rakenteet täyttävät asetetut kriteerit selvästi kaikissa rakenteen toiminnan kannalta kriittisissä kohdissa.

## 8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tavoitteena oli tarkastella tutkimuksen tilanneen Honkarakenne Oyj:n hirsirakenteisissa pientaloissa käytettävien puurakenteisten tuulettuvien yläpohjien rakennusfysikaalista toimintaa. Osana tutkimusta määriteltiin tarkasteltavien rakenteiden toimivuudelle kriteerit ja raja-arvot, joihin perustuen rakenteiden hyväksyttävyyttä arvioitiin. Kriteerien ja raja-arvojen määrittämisestä vastasi TTY:n rakennusfysiikan asiantuntijaryhmä. Tavoitteena oli tutkia, ovatko tilaajan valitsemat yläpohjarakenteet lämpö- ja kosteusteknisesti terveellisiä ja turvallisia nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Tarvittaessa alkuperäisiä rakenteita oli tarkoitus kehittää siten, että ne täyttävät asetetut kriteerit. Lisäksi tavoitteena oli laatia suunnittelu- ja toteutusohjeet sekä tyypipitkät ratkaisut kosteusturvalliselle pientalon puurakenteiselle tasakatolle. Tutkimuksen toteutus pohjautui vuonna 2013 julkaistun FRAME-tutkimusprojektin tarkasteluperiaatteisiin ja tuloksiin.

Rakenteita tutkittiin TTY:llä kehitetyn rakenteiden kosteusteknisen toiminnan analysointimenetelmän mukaisesti. Toimintakriteereiksi valittiin homeen kasvu ja kosteuden kondensoituminen rakenteessa sekä sisäisen konvektion suuruutta kuvaava muunnettu Rayleighin luku. Homeen kasvua rakenteessa tutkittiin VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän parannetun homemallin avulla, ja homeindeksin raja-arvoksi asetettiin  $M_{\max} \leq 1,0$ , mikä tarkoittaa, että homeen kasvua tarkastelupisteissä ei sallittu lainkaan. Homehtumisherkkyyssluokka oli HHL1 lukuun ottamatta tarkastelupistettä, joka sijaitsi vesikattovanerin tai aluskatteen alapinnassa kattoristikoiden k-jaon puolivälissä. Tässä tarkastelupisteessä homehtumisherkkyyssluokka oli vanerin pinnassa HHL2 ja muovipohjaisen aluskatteen pinnassa HHL3. Suhteellisen kosteuden maksimi arvoksi tarkastelupisteissä määritettiin  $RH_{\max} \leq 98$  %. Tällä kriteerillä pyrittiin estämään kosteuden kondensoitumisen rakenteelle aiheuttamat haitat. Sisäinen konvektio heikentää yläpohjarakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, joten sen esiintymistä rajoitettiin valitsemalla muunnettu Rayleighin luvun raja-arvoksi  $Ra_m \leq 5$ . Valitut raja-arvot sisälsivät ylimääraistä varmuutta verrattuna nykyisten rakentamista ohjaavien normien mukaiseen vähimmäistason.

Tutkimus perustui yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan tietokonesimulointiin. Tutkimukseen ei sisällynyt mittauksia todellisissa rakennuksissa tai muuta kokeellista osiota. Rakenteiden toimivuutta tutkittiin ainoastaan käytön aikaisissa olosuhteissa, rakennusaikaisia olosuhteita ei huomioitu. Laskennalliset tarkastelut suoritettiin yhdistettyä lämmön- ja kosteudensiirtoa huokoisissa rakennusmateriaaleissa mal-

lintavalla epästationäärisellä Delphin 5.8.1 -laskentaohjelmalla. Tarkasteltavia yläpohjarakenteita yksinkertaistettiin siten, että niistä voitiin muodostaa 2-ulotteiset laskentamallit. Esimerkiksi kattoristikoiden pysty- ja vinosauvat oli jätettävä huomioimatta, mutta ristikoiden ylä- ja alapaarteet sisältyivät laskentamalleihin. Ulkoilman olosuhteina käytettiin FRAME-projektin yhteydessä määrittyjä Jokioisen testivuosien 2004 ja 2050 ilmastodatoja. Materiaaliominaisuuksina käytettiin pääosin TTY:llä määritettyjä Suomessa käytettävien rakennusmateriaalien ominaisuuksia. Laskentaohjelmasta saatiin rakenteen lämpö- ja kosteusolosuhteita tarkastelupisteissä tunnin välein kuvaava data, jonka perusteella rakenteen toimintaa analysoitiin. Laskenta-aika oli kaksi vuotta tammi-kuun alusta alkaen ja rakenteen toimintaa analysoitiin jälkimmäisen vuoden datan perusteella. Lisäksi sisäistä konvektiota tutkittiin Excel-pohjaisesti laskemalla.

Tarkasteltavia rakennetyyppejä oli yhteensä viisi, joista kaksi oli harjakattorakenteita ja kolme tasakattorakenteita. Harjakatoissa lämmöneristemateriaalina oli puhallettu puukuitueriste ja eristekerroksen paksuutena 400 mm ja 500 mm. Tasakattorakenteista tarkasteltiin tavanomaista huopakatteista rakennetta sekä viherkattoa ja terassikattoa. Lämmöneristeenä tasakatoissa käytettiin sekä puhallettua puukuitueristettä että polyuretaanilevyeristettä. Harjakatto- ja tasakattorakenteiden välinen suurin ero oli tuuletustilan korkeudessa ja ilmanvaihtuvuudessa. Harjakatoilla tuuletustilan korkeus oli 1000 tai 1100 mm ja ilmanvaihtuvuus 0,5 1/h. Tasakattojen tuuletusvälin korkeus oli 150–300 mm ja ilmanvaihtuvuus 0,2 1/h. Tutkimuksessa tarkasteltiin paitsi ideaalisesti toimivia rakenteita, myös tilanteita, joissa rakenteeseen kohdistui ilma- tai sadevuodon aiheuttama ylimääräistä kosteuskuormitusta. Tarkastelupisteet sijoitettiin kaikissa tapauksissa materiaalikerrosten välisiin rajapintoihin.

Alkuperäiset harjakattorakenteet (YP1 ja YP2) eivät täyttäneet asetettuja kriteereitä sellaisenaan. Homeindeksin maksimiarvo oli selvästi alle raja-arvon  $M_{\max} \leq 1,0$  vuosien 2004 ja 2050 ilmastoissa, mutta suhteellisen kosteuden maksimiarvo oli talvella lämmöneristeen yläpinnassa noin kahden kuukauden ajan yli 98 % RH maksimiarvon ollessa 98,5 % RH. Toisaalta ylimääräisestä kosteudesta ei aiheudu tässä kohdassa rakennetta todennäköisesti merkittävää haittaa, koska kosteus voi sitoutua lämmöneristeenä käytettävään puukuitueristeeseen. Harjakattorakenteiden, joissa puhalletun puukuitueristeen paksuus oli 500 mm ja 400 mm, tuloksissa ei ollut suurta eroa. Molemmat rakenteet saatiin paremmin toimiviksi lisäämällä aluskatteen ja ristikon yläpaarten väliin lämmöneristeeksi 20 mm polyuretaanilevy, jolloin suhteellisen kosteuden maksimiarvo jäi alle 98 % RH kaikissa tarkastelupisteissä. Alkuperäisiin harjakattorakenteisiin mallinnettu ilmavuoto ei tuottanut sallittua korkeampia homeindeksin maksimiarvoja tarkastelupisteissä. Suhteellinen kosteus oli ilmavuodon tapauksessa lämmöneristeen yläpinnassa yli 98 % RH talvella noin neljän kuukauden ajan. Sadevuoto sen sijaan aiheutti erittäin runsasta homekasvua lämmöneristeen yläpinnan ja aluskatteen väliselle alueelle, jossa myös suhteellinen kosteus oli yli 98 % RH yhtäjaksoisesti noin puolen vuoden ajan maksimiarvon ollessa 100 % RH.

Kaikki tarkastellut tasakattorakenteet osoittautuivat toimiviksi ilman kosteus- ja ilmapuotoja alkuperäisessä muodossaan vuosien 2004 ja 2050 ilmastoissa, joten niihin ei ollut tarpeen tehdä parannuksia. Puhalletulla puukuitueristeellä toteutetuissa tasakatoissa homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot olivat jonkin verran korkeampia kuin polyuretaanilevyllä eristetyissä rakenteissa. Puukuitueristeellä toteutetuissa tasakatoissa ilmapuoto tuotti homeindeksin maksimi-arvoksi noin 1,5-2 lämmöneristeen ulkopinnan ja vesikattovanerin välisellä alueella, joten rakenteissa esiintyy mikroskooppilla havaittavaa homekasvua. Suhteellinen kosteus ei kuitenkaan ilmapuodon tapauksessa ylittänyt asetettua yläraja-arvoa, joten kosteuden kondensoitumisen riskiä ei esiintynyt ilmapuototapauksessa. Sadevuoto aiheutti homeindeksin maksimi-arvoksi lähes 6 lämmöneristeen ulko-osan ja vesikattovanerin välillä, mikä tarkoittaa, että tällä alueella esiintyy erittäin runsasta homekasvua. Suhteellinen kosteus ylitti samalla alueella 98 % RH noin puolen vuoden kuluttua laskennan alkuhetkestä eikä laskenut enää lainkaan sen alle laskenta-ajan ollessa 2 vuotta.

Ilma- ja sadevuototarkastelujen perusteella yläpohjarakenteiden toiminta heikkenee, jos rakenteeseen kohdistuu ylimääräistä kosteuskuormitusta. Sadevuodon vaikutus on selvästi suurempi kuin ilmapuodon. Ilmapuoto heikentää olosuhteita eniten lähellä rakenteen sisäpintaa ja tiloja, joissa rakennuksen käyttäjät oleskelevat. Sadevuoto sen sijaan vaikuttaa eniten olosuhteisiin yläpohjarakenteen ulko-osissa. Ilmapuodon rakenteen kosteusteknistä toimintaa heikentävä vaikutus voidaan kompensoida lisäämällä yläpohjan tuuletusta. Sadevuoto taas heikentää yläpohjarakenteiden kosteusolosuhteita niin paljon, että rakenteista ei saada toimivia pelkästään ilmanvaihtoa kasvattamalla tai lisäämällä lämmöneristettä rakenteen ulko-osaan.

Ilmanvaihtuvuuden havaittiin olevan yläpohjarakenteen toiminnan kannalta hyvin kriittinen tekijä. Jotta rakenne toimisi optimaalisella tavalla, tulee ilmanvaihtuvuuden olla riittävä mutta ei liian suuri. Täysin ideaaliselle, vuotamattomalle yläpohjarakenteelle riittää pienempi ilmanvaihtuvuus kuin rakenteelle, jossa on kosteusvuotoja. Tutkimuksen perusteella ihanteellinen ilmanvaihtokerroin olisi tasakatoille noin 2-5 1/h ja harjakatoille noin 0,5-1 1/h. Nämä ilmanvaihtokertoimet ovat toimivia myös silloin, kun yläpohjarakenteessa on pienehkö ilmapuoto. Tällä ilmanvaihtuvuudella homeen kasvua ei tapahdu myöskään varjossa olevassa yläpohjassa. Tutkimuksessa havaittiin myös, että hygroskooppinen puumateriaali tasoittaa yläpohjarakenteessa vallitsevien kosteusolosuhteiden vaihtelua ennakoitua enemmän. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot jäivät matalammiksi niissä rakenteissa, joiden puuosien kosteuskapasiteetti oli huomioitu laskentatarkasteluissa.

Sisäistä konvektiota tutkittiin yläpohjien puhalletussa puukuitueristeessä laskennallisesti vertaamalla keskenään sideaineetonta ja sideaineellista puhalluseristettä sekä korvaamalla osa puhalluseristeestä vähemmän ilmaa läpäisevällä levyeristeellä. Laskentatuloksista havaittiin, että 400 mm ja 500 mm kerros sideaineetonta puukuitueristettä eivät

täytä muunnetulle Rayleighin luvulle asetettua raja-arvoa  $Ra_m \leq 5$ . Sen sijaan vaihtamalla puhallusvilla sideaineelliseksi voitiin asetettu raja-arvo alittaa selvästi molemmilla eristepaksuuksilla. Raja-arvo alittui myös korvaamalla 400 mm puhalluseristettä puukuitueristelevyn ja puhalluseristeen tai polyuretaanieristelevyn ja puhalluseristeen yhdistelmällä. 500 mm eristepaksuuden tapauksessa puukuitueristelevyn käyttämisestä ei enää ollut riittävää hyötyä, mutta polyuretaanilevyn ja puhalluseristeen yhdistelmä oli mahdollinen ratkaisu tässäkin tapauksessa. Polyuretaanilevy on sijoitettava yläpohjarakenteessa puhallusvillan alapuolelle, jotta rakenteen vesihöyrynvastus pienenee rakenteen ulko-osaa kohti.

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että yläpohjarakenteen ulko-osan lämmönvastusta kasvattamalla voidaan tarvittaessa parantaa rakenteen toimivuutta. Käytännössä parannus voidaan toteuttaa lisäämällä pienehkö määrä levymäistä lämmöneristettä kattoristikoiden yläpaarteiden yläpuolelle. Lämmöneristeen lisääminen ei kuitenkaan ole taloudellisesti järkevää, jos tuuletustilan ilmanvaihtuvuus on hyvin pieni ja rakenteessa on samanaikaisesti ilmavuoto. Tutkimustulosten perusteella tehokkain tapa varmistaa yläpohjarakenteen kosteustekninen toimivuus on ensisijaisesti pyrkiä estämään ilma- ja sadevuodot rakenteeseen, sen jälkeen tarvittaessa lisätä rakenteen tuuletusta kohtuulliselle tasolle ja vasta tämän jälkeen kasvattaa rakenteen ulko-osan lämmönvastusta. Vesikaton vesitiivyyden ja yläpohjarakenteen ilmatiivyyden huolellinen varmistaminen on sitä olennaisempaa, mitä heikommin rakenne tuulettuu. Käytettäessä yläpohjan lämmöneristeenä puhallettua puukuitueristettä, voidaan sisäisen konvektion haitalliset vaikutukset välttää yksinkertaisesti valitsemalla sideaineellinen puhalluseriste.

Yläpohjarakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan laskennallinen tarkastelu osoittautui tutkimuksen edetessä haasteelliseksi. Monet tietokoneohjelmalla mallinnetuista tapauksista olivat numeerisesti vaikeita, mikä johti ajallisesti pitkiin, jopa 250 tunnin mittaisiin laskenta-aikoihin. Yläpohjarakenteiden toiminta riippuu monista tekijöistä, jotka myös vaikuttavat toisiinsa epälineaarisesti. Sen seurauksena yhdestäkin rakenteesta olisi ollut mahdollista tehdä lukuisia laskentatarkasteluja, joiden määrää oli kuitenkin rajoitettava, koska käytettävät resurssit olivat rajalliset. Rajauksesta huolimatta tässä tutkimuksessa tehtiin viidelle rakenteelle yhteensä yli 200 erilaista laskentatarkastelua, jotta voitiin tehdä päätelmiä tulosten luotettavuudesta ja johdonmukaisuudesta. Useampien variaatioiden tekeminen samasta rakenteesta esimerkiksi lämmöneristemateriaalin ja eristepaksuuden sekä rakenteen ilmanvaihtuvuuden ja kosteusvuotojen suuruuden suhteen helpottaisi tulosten vertailua ja yleistettävyyttä. Lisäksi todellisissa yläpohjarakenteissa esiintyviä ilmanvaihtuvuuksia ja ilma- sekä sadevuotojen suuruuksia olisi tarpeen mitata, jotta laskennallisen mallinnuksen tarkkuutta voitaisiin parantaa.

## LÄHTEET

Asumisterveysohje. Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003. 2003. Helsinki, Sosiaali- ja terveysministeriö.

Bauklimatik Dresden. Delphin [WWW]. [viitattu 8.9.2014]. Saatavissa: <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>.

Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus - Rakennusfysiikka. Helsinki, Rakennustieto Oy.

Entec Oy. Rakennusten lämpökuvaus [WWW]. [viitattu 29.9.2014]. Saatavissa: <http://www.entec.fi/lampokuvaus.html>.

ETA-09/0081. 2010. European Technical Approval. Ekovilla in-situ formed loose fill cellulose fibre insulations. Espoo, VTT Expert Services Ltd. 7 p.

Hagentoft, C. 2001. Introduction to Building Physics. Lund, Studentlitteratur. 422 p.

Hukka, A. and Viitanen, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33, 1999, pp. 475–485.

Ilmatieteen laitos. Suomen muuttuva ilmasto [WWW]. Päivitetty 14.1.2014 [viitattu 29.7.2014]. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/8c965cac-6707-4a60-bef9-712f038320be/suomen-muuttuva-ilmasto.html>.

Ilmatieteen laitos. Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet [WWW]. Päivitetty 9.6.2014 [viitattu 9.9.2014]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/Rakennusfysiikan-testivuodet-nykyilmastossa>.

Kaila, P. 1997. Talotohtori – Rakentajan pikkujättiläinen. 2. painos. Porvoo, WSOY. 661 s.

Kokko, E., Ojanen, T., Salonvaara, M., Hukka, A. ja Viitanen, H. 1999. Puurakenteiden kosteustekninen toiminta. VTT Tiedotteita 1991. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 160 s.

Korjaustieto. Tyypilliset kosteus- ja homevauriot 1960-luvulla ja aiemmin rakennetuissa pientaloissa [WWW]. Ympäristöministeriö. [viitattu 4.8.2014] Saatavissa: <http://www.korjaustieto.fi/pientalot/sisailmaongelmat/kosteus-ja-homevauriot/tyypilliset-kosteus-ja-homevauriot-1960-luvulla-ja-aiemmin-rakennetuissa-pientaloissa.html>.

L 5.2.1999/132. Maankäyttö- ja rakennuslaki.

Lahdensivu, J., Suonketo, J., Vinha, J., Lindberg, R., Manelius, E., Kuhno, J., Saastamoinen, K., Salminen, K. ja Lähdesmäki, K. 2012. Matalaenergia- ja passiivitalojen



rakenteiden ja liitosten suunnittelu- ja toteutusohjeita. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 160. 121 s. + 1 liite..

Mäkitalo, M. 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 134 s. + 37 liite..

Palomäki, E. 2000. Kosteus- ja homevauriot. In: Koskenvesa A. Rakentajain kalenteri 2000. Helsinki, Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry ja Rakennustietosäätiö RTS. s. 497–504.

Partanen, P., Jääskeläinen, E., Nevalainen, A., Husman, T., Hyvärinen, A., Korhonen, L., Meklin, T., Miller, K., Forss, P., Saajo, J., Röning-Jokinen, I., Nousiainen, M., Tolvanen, R. ja Henttinen, I. 1995. Pientalojen kosteusvauriot – yleisyyden ja korjauskustannusten selvittäminen. Kuopio, Kansanterveyslaitos. 48 s.

Pentti, M. Rakenteiden historia – pientalot. 2012. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentokalvot. 90 s.

Pirinen, J. 2006. Pientalojen mikrobivauriot – Lähtökohtana asukkaiden kokemat terveyshaitat. Hengitysliiton julkaisuja 19/2006. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. 128 s.

Rakennustietosäätiö. Onko rakennusala valmis matalaenergia- ja passiivirakentamiseen? [WWW]. [viitattu 25.9.2014]. Saatavissa: <http://www.rakennustieto.fi/lehdet/ry/index/lehti/5nyzLSAcu.html>.

RakMK C2. 1998. Kosteus. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. 16 s.

RakMK C4. Luonnos 16.3.2012. Lämmöneristys. Ohjeet 2012. Ympäristöministeriö. 47 s.

RakMk D2. 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. 34 s.

Reijula, K., Ahonen, G., Alenius H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E., Reiman, M. 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisu 1/2012. Espoo, Tarkastusvaliokunta. 205 s.

RIL 107–2012. Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet. 2012. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 211 s.

RT 05-10710. 1999. Rakennustieto. Kosteus rakennuksissa, ohjetiedosto. Helsinki, Rakennustietosäätiö. 8 s.

RT 37917. 2010. Rankka-aluskate ja kondenssisuoja, tarvike tieto. Helsinki, Rakennustietosäätiö. 2 s.

RT 38313. 2012. Rakennuksen vaipan kosteudenhallintajärjestelmät, tarvike tieto. Helsinki, Rakennustietosäätiö. 6 s.

Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy, Isover. Puurakenteinen ristikkoyläpohja [WWW]. [viitattu 13.9.2014]. Saatavissa: <http://www.isover.fi/suunnittelu/rakennekirjasto/5243/yp-1102>.

SFS-EN ISO 10456. 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 30 s.

Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka – Perusteet ja sovelluksia. Tampere, Rakennustieto Oy. 256 s.

Sisäilmayhdistys. Kosteuslähteet [WWW]. [viitattu 29.9.2014]. Saatavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kosteusvauriot/kosteustekninen-toiminta/kosteuslahteet/>.

Tiivistalo. System Intello [WWW]. [viitattu 29.9.2014]. Saatavissa: <http://www.tiivistalo.fi/system/default.asp?sivu=system%20intello>.

Vinha, J. 2007. Hygrothermal Performance of Timber-Framed External Walls in Finnish Climatic Conditions: A Method for Determining the Sufficient Water Vapour Resistance of the Interior Lining of a Wall Assembly. DSc Thesis, Tampere University of Technology. 338 p. + app. 10 p.

Vinha J. 2009. Rakennusten rakennusfysikaalisen suunnittelun ja rakentamisen periaatteet. In: Koskenvesa A. Rakentajain kalenteri 2009. Helsinki, Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry ja Rakennustietosäätiö RTS. s. 362–381.

Vinha, J. Rakennusfysiikka. 2011. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 767 s.

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. ja Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tutkimusraportti 159. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka. 354 s. + 43 liites..

Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T., Iiitti, H. Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. (Julkaistaan myöhemmin).

Ympäristöministeriö. Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnitteluarvoja [WWW]. Energiatodistusoppaan liite. Julkaistu 14.11.2013, Päivitetty 30.5.2014 [viitattu 25.9.2014]. Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen\\_energia\\_ja\\_ekotehokkuus/Rakennuksen\\_energiatodistus/Energiatodistuslomakkeet/Energiatodistuslomakkeet%2817454%29](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus/Rakennuksen_energiatodistus/Energiatodistuslomakkeet/Energiatodistuslomakkeet%2817454%29)

Ympäristöopas 28. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. 1997. Tampere, Ympäristöministeriö. 143 s.

## **LIITTEET**

### **LIITE 1**

Alkuperäisten yläpohjarakenteiden rakennekuvat 5 s.

### **LIITE 2**

Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet 1 s.

### **LIITE 3**

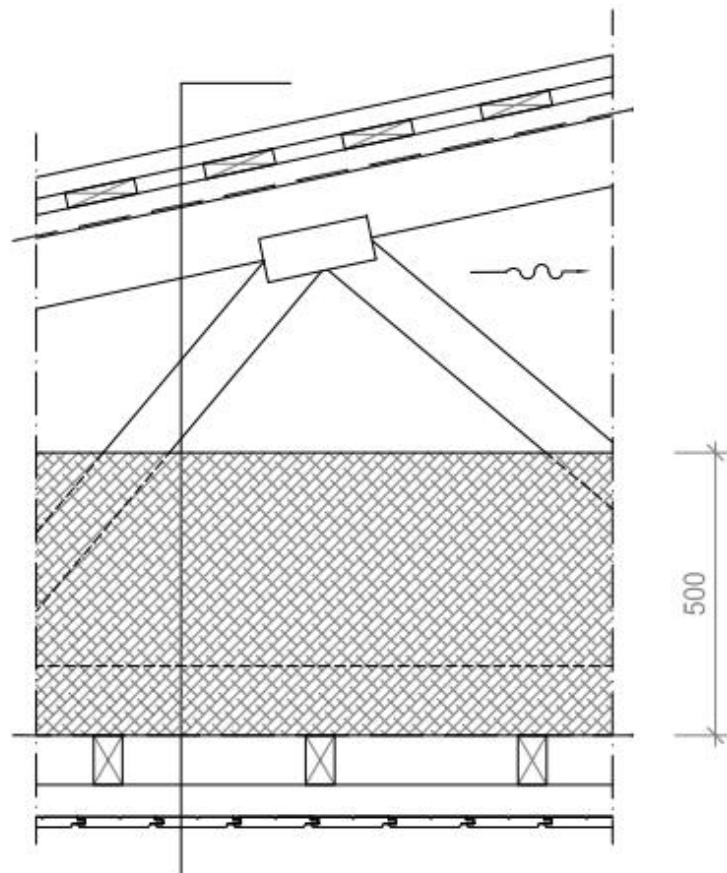
Materiaalien tasapainokosteuskäyriä 3 s.

### **LIITE 4**

Jokioisen rakennusfysikaaliset testivuodet 2004 ja 2050 4 s.

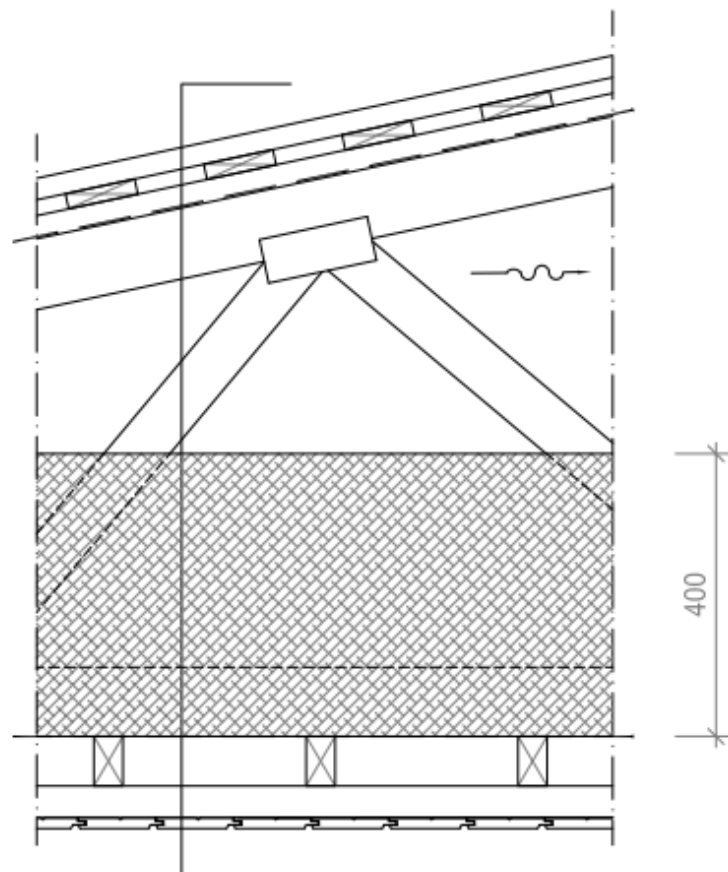
YP1

1. RUUKKI CLASSIC-PELTIKATE
2. RUODELAUDOITUS 22x100 K 200
3. KOROKERIMA 28x50 K 900 LAPPEEN SUUNTAISESTI RISTIKOIDEN KOHDILLE
4. KONDENSSISUOJATTU ALUSKATE
5. TUULETETTU YLÄPOHJATILA
6. NAULALEVYRISTIKOT K 900 + EKOVIILLA-PUUKUITUERISTE 500 mm
7. PROCLIMA INTELLO-HÖYRYNSULKUKANGAS
8. KOOLAUS 41x70 K 300
9. KOOLAUS 41x45 K 600 / K 400
10. SISÄKATTOPANEELI 15 mm / KIPSILEVY 13 mm

**Kuva L1.1.** Harjakattoyläpohja YP1.

YP2

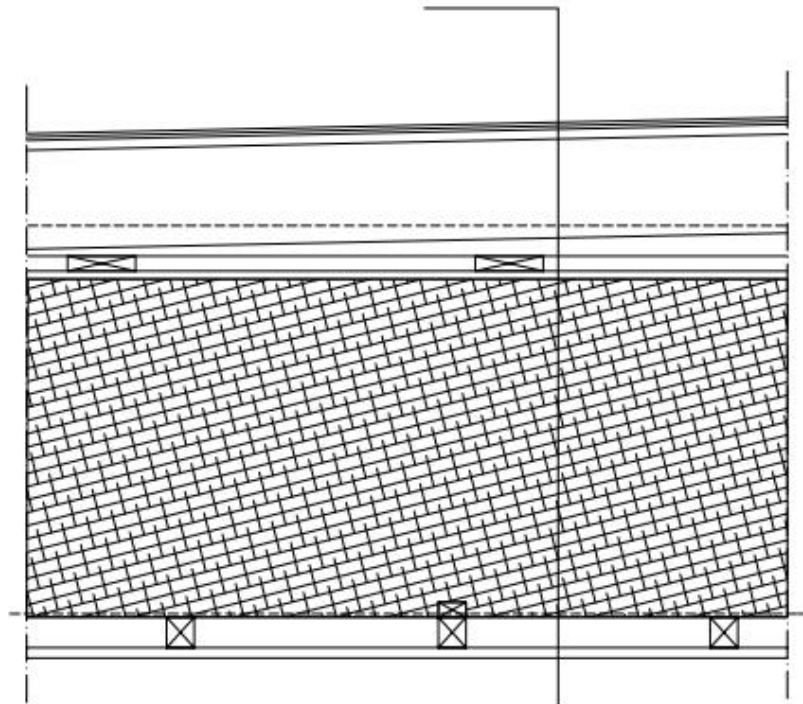
1. RUUKKI CLASSIC-PELTIKATE
2. RUODELAUDOITUS 22x100 K 200
3. KOROKERIMA 28x50 K 900 LAPPEEN SUUNTAISESTI RISTIKOIDEN KOHDILLE
4. KONDENSSISUOJATTU ALUSKATE
5. TUULETETTU YLÄPOHJATILA
6. NAULALEVYRISTIKOT K 900 + EKOVIILLA-PUUKUITUERISTE 400 mm
7. PROCLIMA INTELLO-HÖYRYNSULKUKANGAS
8. KOOLAUS 41x70 K 300
9. KOOLAUS 41x45 K 600 / K 400
10. SISÄKATTOPANEELI 15 mm / KIPSILEVY 13 mm



**Kuva L1.2.** Harjakattoyläpohja YP2.

TK1

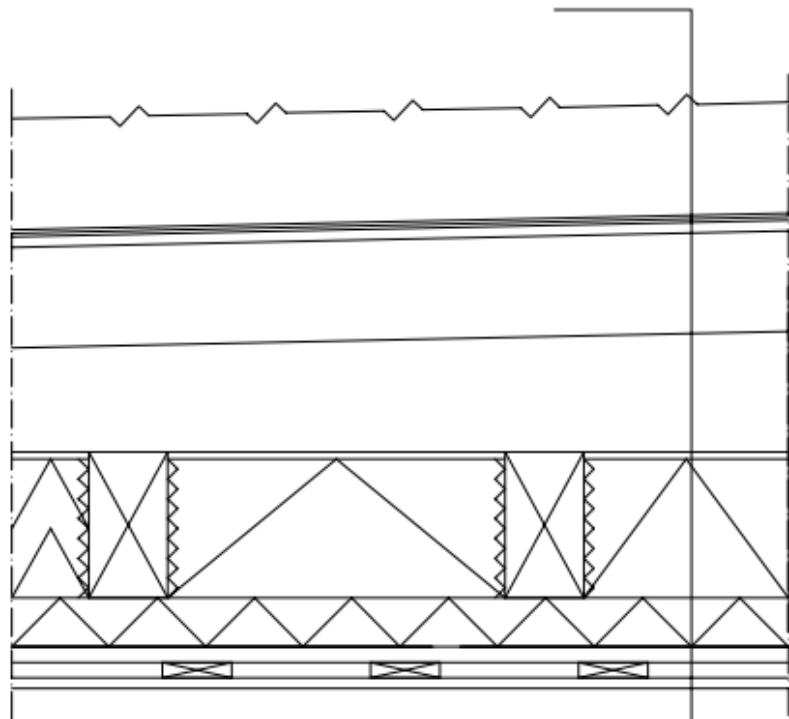
- HUOPAKATE VE40
- HOMESUOJATTU VESIKATTOVANERI 15 mm (HR)
- RISTIKON YLÄPAARRE K900 (HR)
- TUULETUSTILA
- KIINNITYSRIMAT 41\*45 MP KATTORISTIKON (HR)
- TUKILAUDAT 22\*100 k600 (HR)
- TUULENSUOJALEVY 12 mm (HR)
- NR-RISTIKOT K900 JA PUUKUITUERISTE 500 mm (HR)
- HÖYRYNSULKUMUOVI 0,2 mm; SAUMAT LIMITETÄÄN 200 mm JA TEIPATAAN SEKÄ SAUMAKOHDAT PURISTETAAN KAHDEN PUUN VÄLIIN (kts. erillinen ohje) (HR)
- KOOLAUS 41x45 k300 (HR)
- KATTOPANEELI 15 mm TAI KIPSILEVY 13 mm



**Kuva L1.3.** Tasakattoyläpohja TK1.

TK2

- Kasvillisuus
- Kekkilä Viherix-kattomulta tai turvelevy valm. ohj. mukaisesti
- Icopal Fonda GreenXtra valm. ohj. mukaisesti
- Icopal Graviflex juurisuojaattu kumibitumikermi valm. ohj. mukaisesti
- HUOPAKATE VE40
- HOMESUOJATTU VESIKATTOVANERI 19 mm (HR)
- KATTORISTIKOT K900 (HR),  
TUENTA PUUPALKEISTA
- TUULETUSTILA
- KANTAVAT PUUPALKIT 113\*210 K600/900 JA URETAANIERISTE 200 mm (HR)
- URETAANIERISTE 70 mm, SAUMAT VAAHDOTETTU TIIVIIKSI (HR)  
(toimii höyrynsulkuna)
- KOOLAUS 22\*100 k600 (HR)
- KOOLAUS 22\*100 k300 (HR)
- KATTOPANEELI 15 mm TAI KIPSILEVY 13 mm

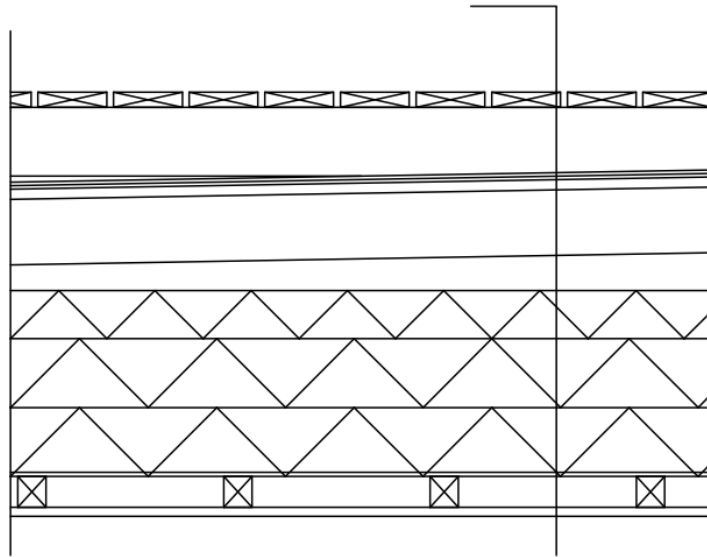


**Kuva L1.4.** Tasakattoyläpohja TK2.



TK3

- TERASSILAUDOITUS
- PARVEKEVASAT 38\*100 k400, kavennus työmaalla
- HUOPAKATE VE40
- HOMESUOJATTU VESIKATTOVANERI 15 mm (HR)
- PARVEKEVASAT 41\*95 k400 (HR)
- TUULETUSTILA
- URETAANIERISTE 170 mm
- ALASLASKU 41\*95 k600 JA URETAANIERISTE 100 mm  
(toimii höyrynsulkuna) (HR)
- KOOLAUS 41x45 k300 (HR)
- KATTOPANEELI 15 mm TAI KIPSILEVY 13 mm

**Kuva L1.5.** Tasakattoyläpohja TK3.

|   |
|---|
| FRAME-tutkimuksessa käytetty arvo                   |
| Delphin-ohjelman materiaalitietokannasta saatu arvo |
| Muusta lähteestä saatu arvo                         |

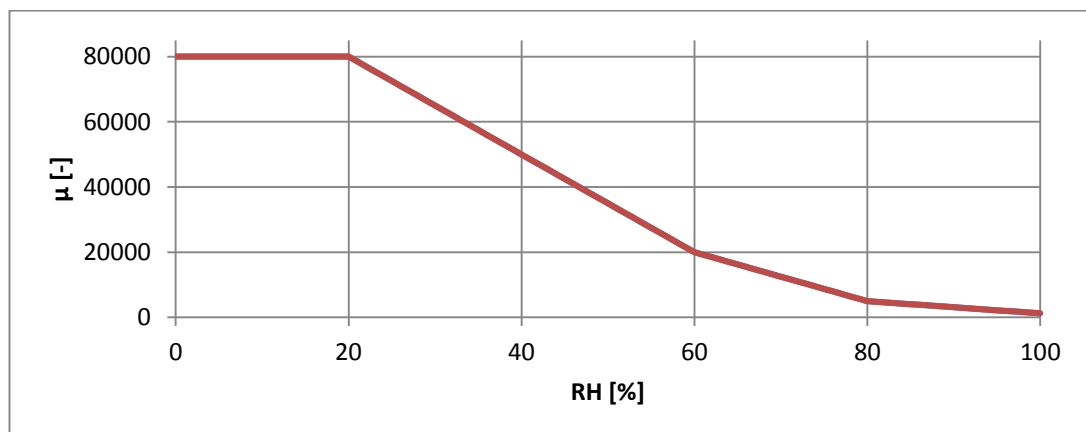
|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| $\rho$    | tiheys                   |
| $n$       | huokoisuus               |
| $\lambda$ | lämmönjohtavuus          |
| $c$       | ominaislämpökapasiteetti |
| $\mu$     | diffuusiovastuskerroin   |
| $k_a$     | ilmanläpäisevyys         |

| materiaali                |                 | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $n$<br>[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] | $\lambda$<br>[W/mK] | $c$<br>[J/kgK] | $\mu$<br>[-]         | $k_a$<br>[m <sup>3</sup> /(msPa)] |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|--|---------------------|----------------|----------------------|-----------------------------------|
| Aluskate <sup>(1)</sup>   | yläpinta        | 980                            | 0.001                                    | 0.15                | 2300           | 89000                | -                                 |
|                           | alapinta        | 1000                           | 0.1                                      | 0.2                 | 1400           | 1                    | -                                 |
| Bitumi                    |                 | 1200                           | 0.0026                                   | 0.145               | 2000           | 15000                | -                                 |
| Havuvaneri 15 mm          |                 | 394                            | 0.65                                     | 0.11                | 1500           | 232                  | -                                 |
| Huokoinen puukuitulevy    |                 | 280                            | 0.85                                     | 0.052               | 1500           | 4.6                  | -                                 |
| Hygrokalvo                |                 | 425                            | 0.386                                    | 0.17                | 1000           | 80000 <sup>(2)</sup> | -                                 |
| Ilma                      | d=1000 mm       | 1.25                           | 1  | 5                   | 1000           | 0.2                  | 0.1                               |
|                           | d=300 mm        | 1.25                           | 1  | 2.6                 | 1000           | 0.2                  | 0.1                               |
|                           | d=200 mm        | 1.25                           | 1  | 1.7                 | 1000           | 0.2                  | 0.1                               |
|                           | d=150 mm        | 1.25                           | 1  | 1.3                 | 1000           | 0.2                  | 0.1                               |
|                           | d=100 mm        | 1.25                           | 1  | 0.86                | 1000           | 0.2                  | 0.1                               |
|                           | d=50 mm         | 1.3                            | 1  | 0.313               | 1050           | 0.2                  | 0.1                               |
| Kipsilevy 13 mm           |                 | 774                            | 0.604                                    | 0.19                | 1100           | 7.9                  | -                                 |
| Mänty <sup>(3)</sup>      |                 | 532                            | 0.7                                      | 0.120               | 2000           | 84                   | -                                 |
| Polyuretaanilevy          |                 | 35                             | 0.949                                    | 0.024               | 1500           | 100                  | -                                 |
| Puukuitueriste irrallinen |                 | 36                             | 0.926                                    | 0.040               | 1600           | 2.1                  | 2.30E-04                          |
|                           | sideaineellinen | 36                             | 0.926                                    | 0.040               | 1600           | 2.1                  | 5.00E-05                          |
| Teräs                     |                 | 7800                           | 1.5E-06                                  | 47                  | 470            | 200000               | -                                 |
| Turve                     |                 | 1100                           | -  | 1                   | 1500           | -                    | -                                 |

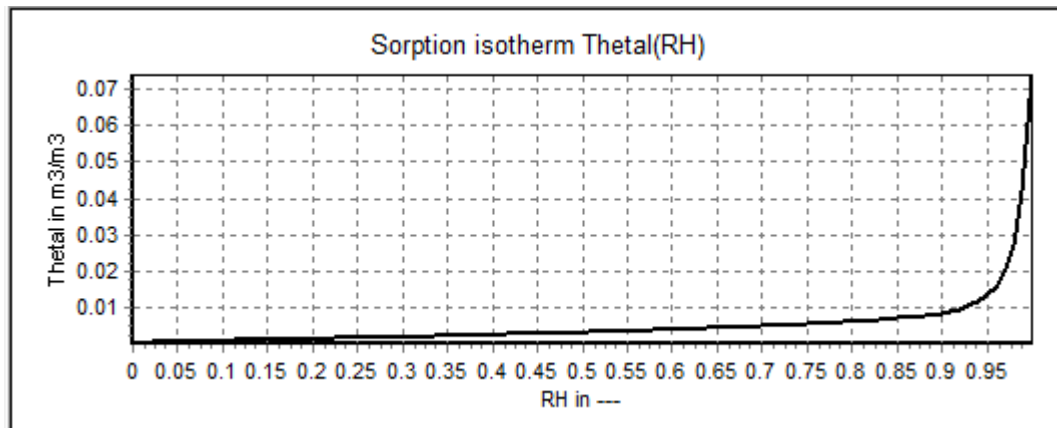
<sup>(1)</sup> Kondenssisuojattu aluskate, yläpinnassa vesitiivis PE-kalvo, alapinnassa imukykyinen kuitukangas.

<sup>(2)</sup> Hygrokalvon vesihöyryn diffuusiovastuskerroin on suhteellisesta kosteudesta riippuva oheisen kuvaajan mukaisesti.

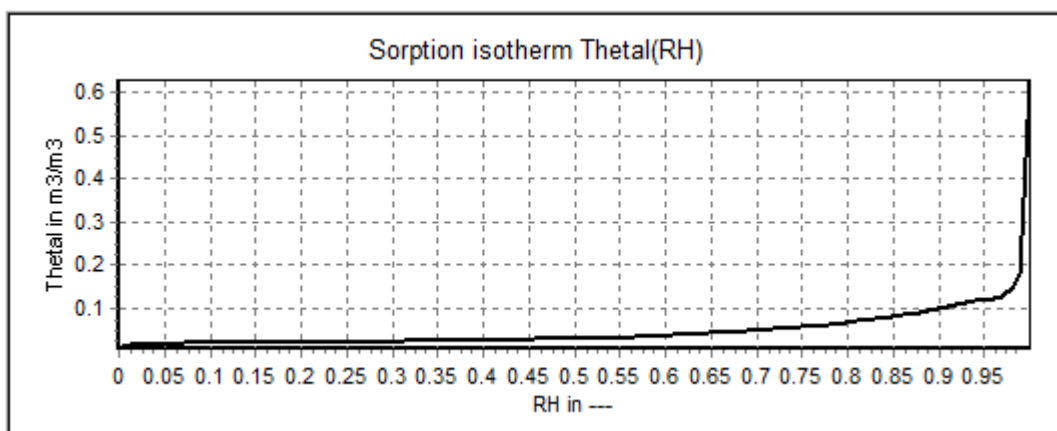
<sup>(3)</sup> Kohtisuoraan syitä vastaan.



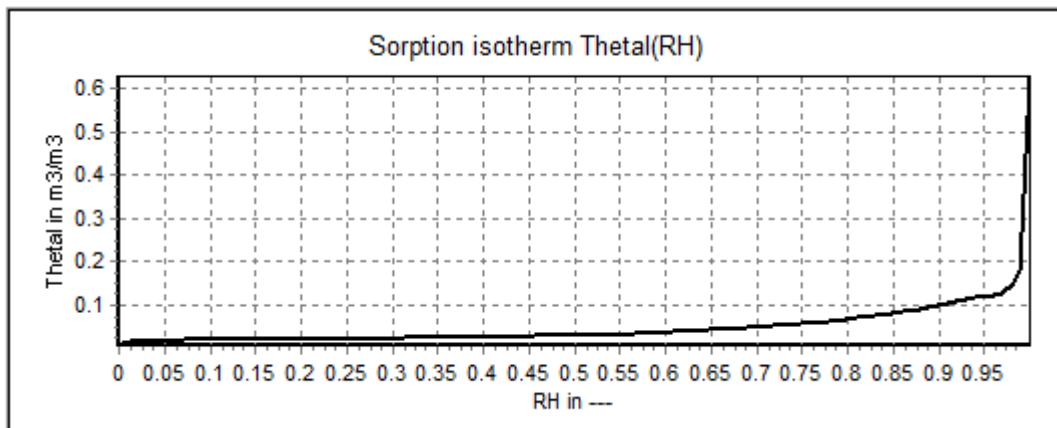
**Kuva L2.1.** Hygrokalvon diffuusiovastuskerroin suhteellisen kosteuden funktiona.



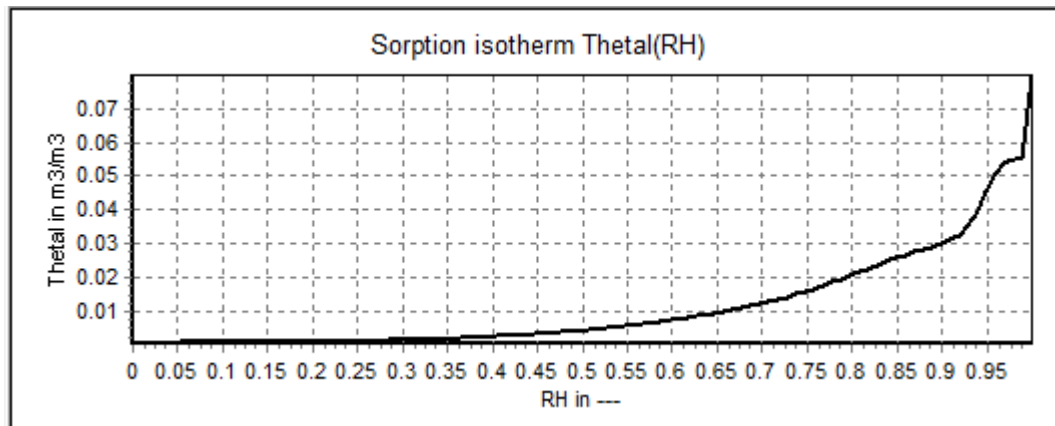
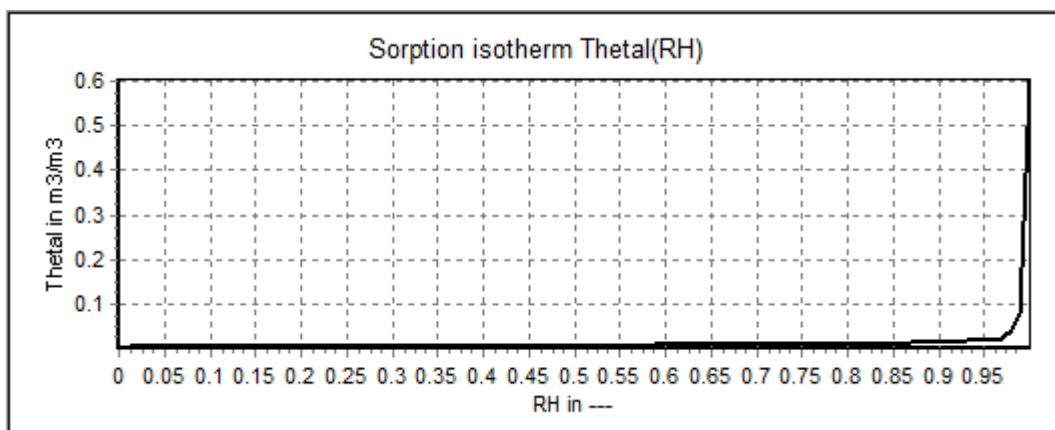
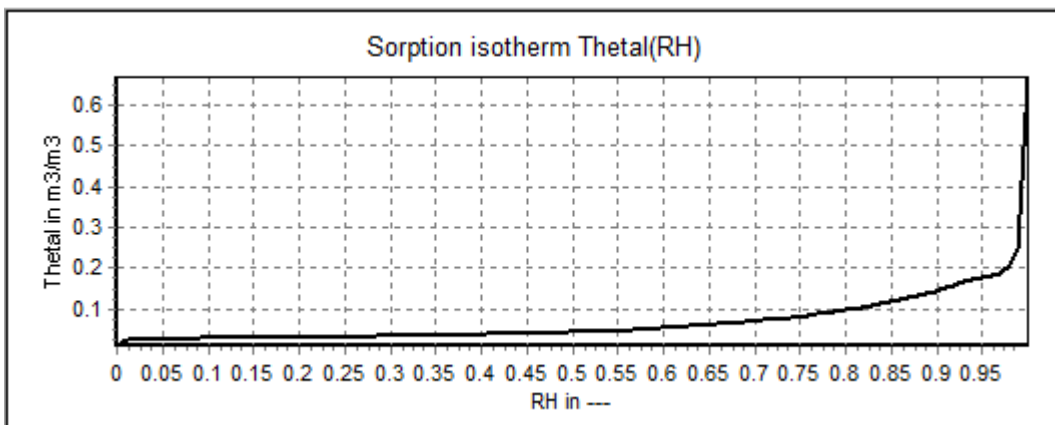
**Kuva L3.1.** Kondenssisuojatun aluskatteen alapinnan tasapainokosteuskäyrä.

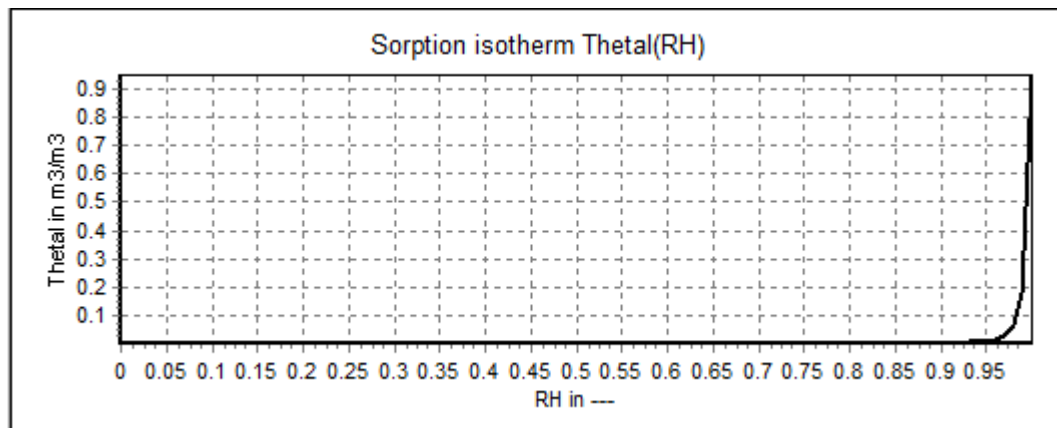
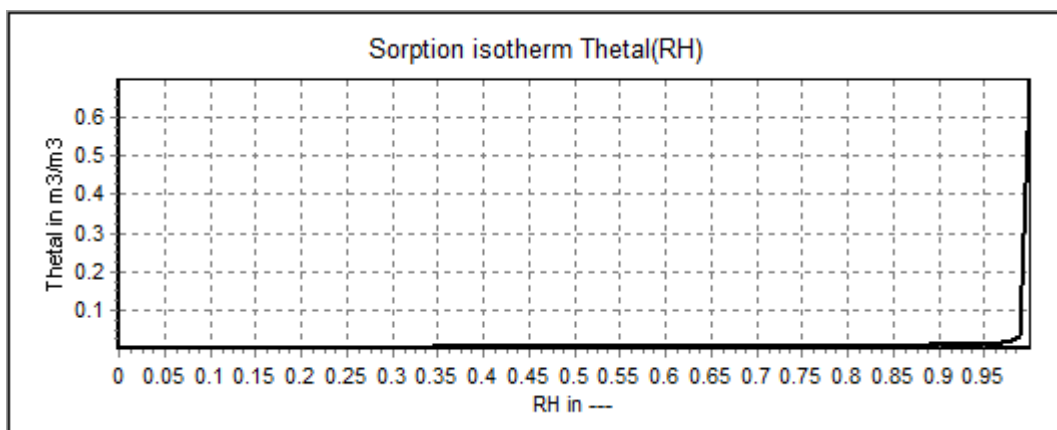


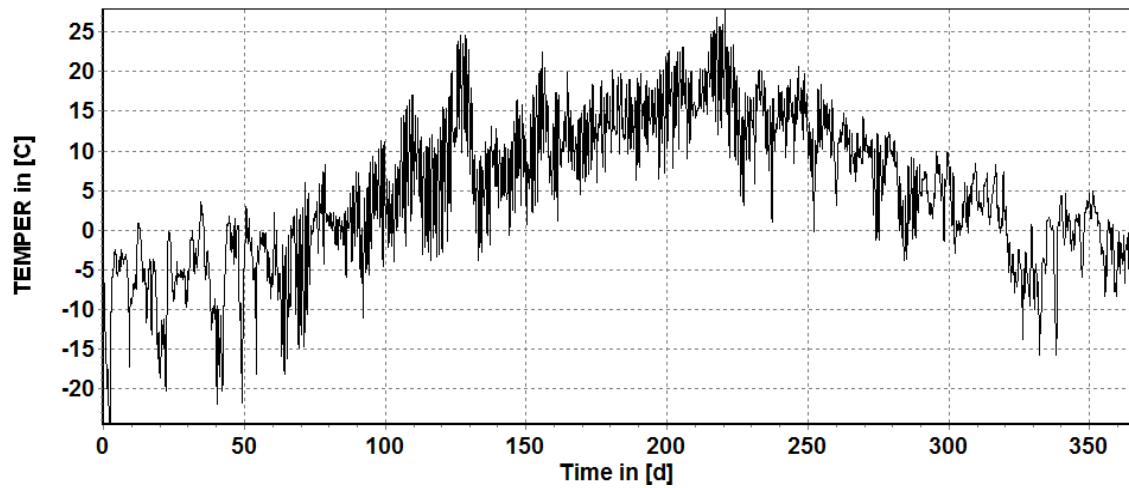
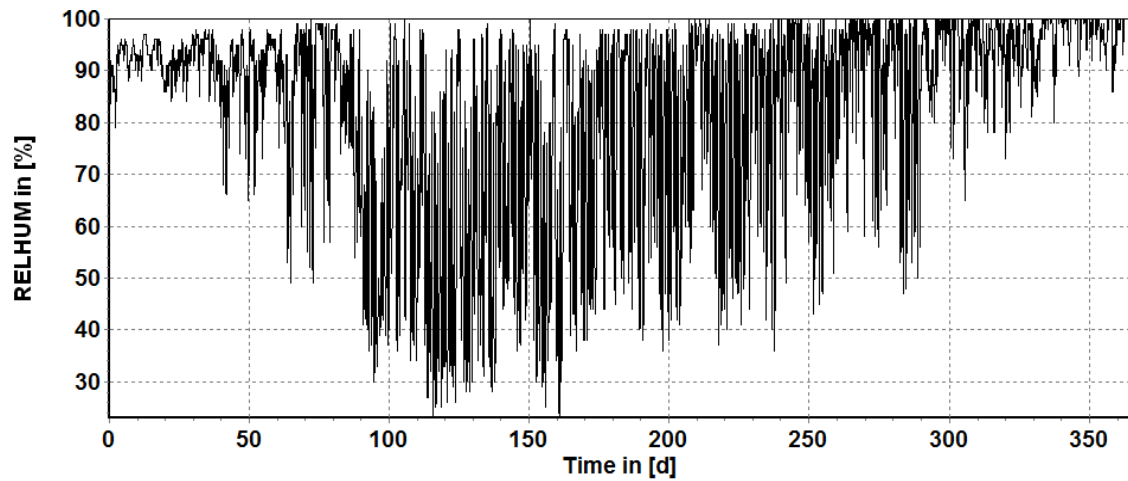
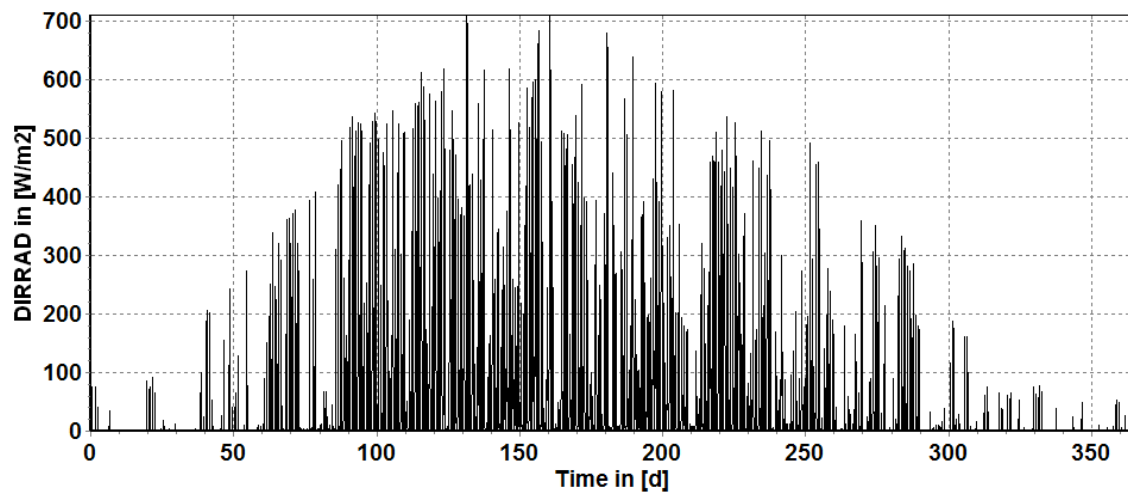
**Kuva L3.2.** Havuvanerin tasapainokosteuskäyrä.

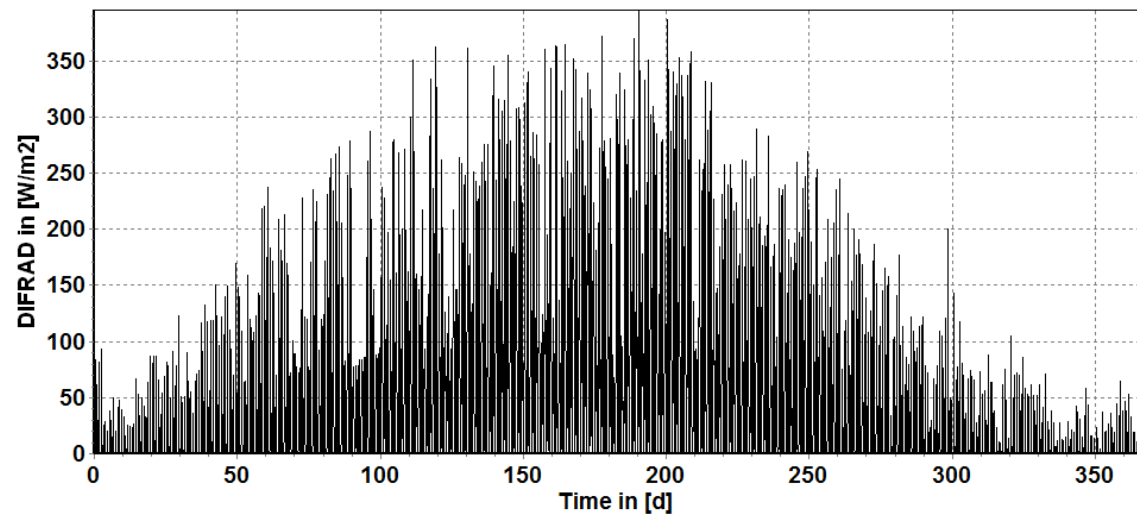


**Kuva L3.3.** Huokoisen puukuitulevyn tasapainokosteuskäyrä.

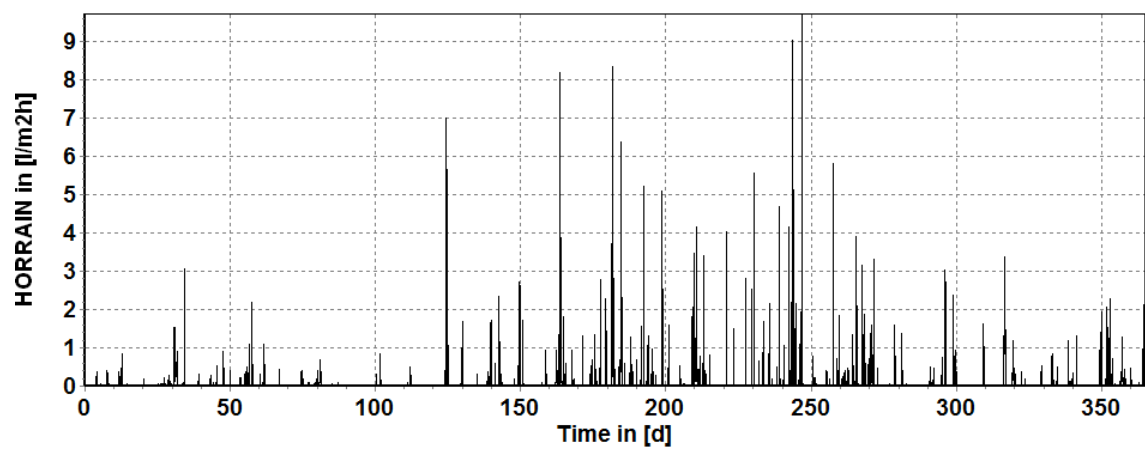
**Kuva L3.4.** Hygrokalvon tasapainokosteuskäyriä.**Kuva L3.5.** Kipsilevyn tasapainokosteuskäyriä.**Kuva L3.6.** Männyn tasapainokosteuskäyriä (kohtisuoraan syitä vastaan).

**Kuva L3.7.** Polyuretaanin tasapainokosteuskäyrä.**Kuva L3.8.** Puukuitueristeen tasapainokosteuskäyrä.

**Jokioinen 2004****Kuva L4.1.** Ulkoilman lämpötila Jokioisissa 2004.**Kuva L4.2.** Ulkoilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2004.**Kuva L4.3.** Suoran auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2004.

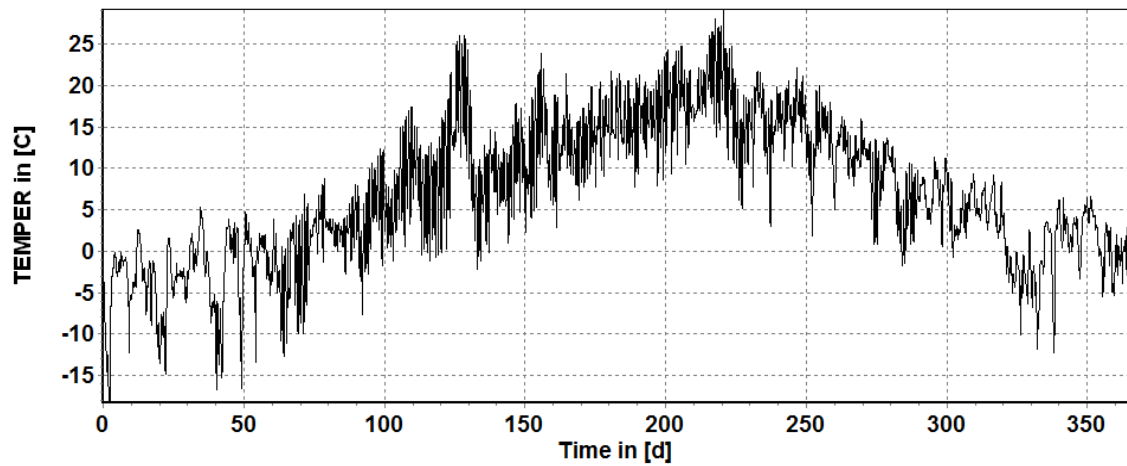


**Kuva L4.4.** Diffuusin auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2004.

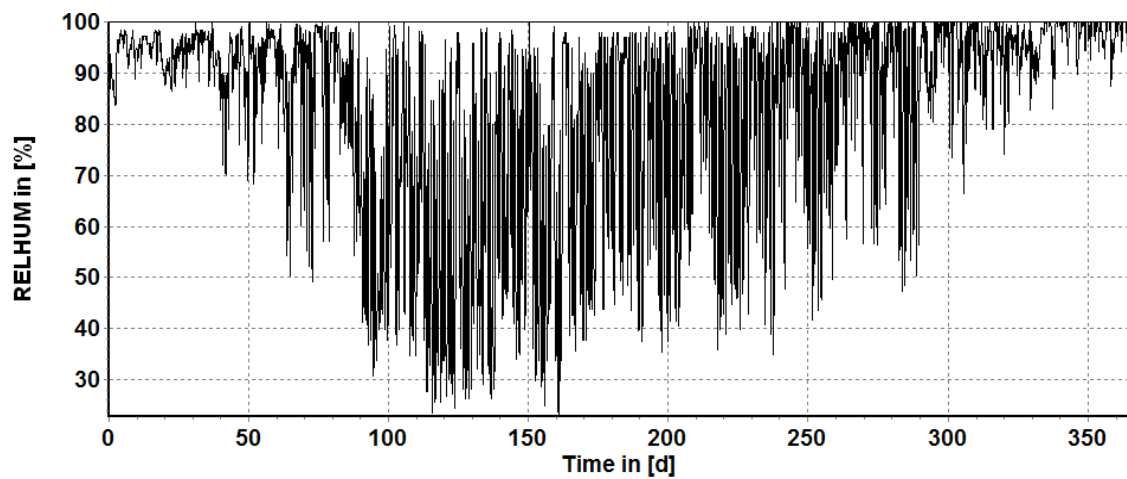


**Kuva L4.5.** Sateen kokonaismäärä vaakapinnalle Jokioisissa 2004.

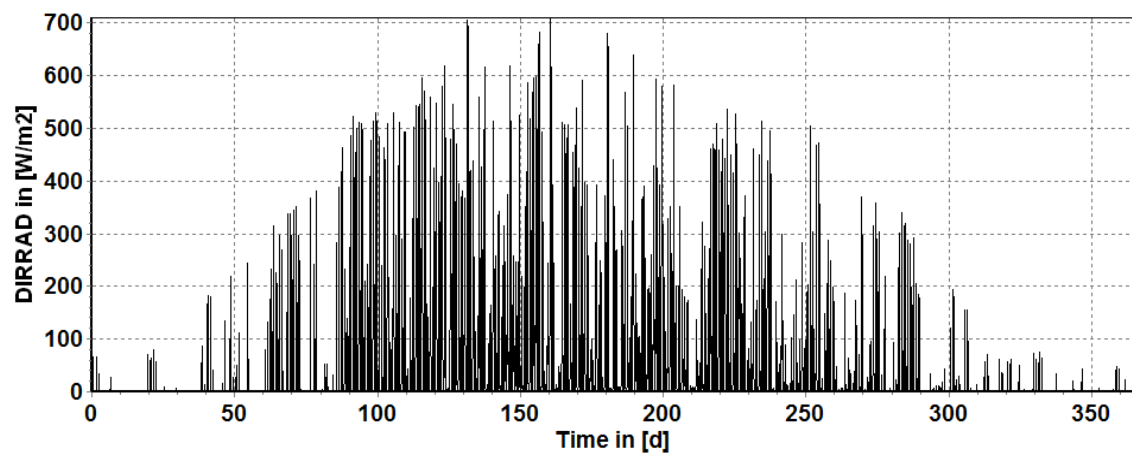
## Jokioinen 2050



Kuva L4.6. Ulkoilman lämpötila Jokioisissa 2050.

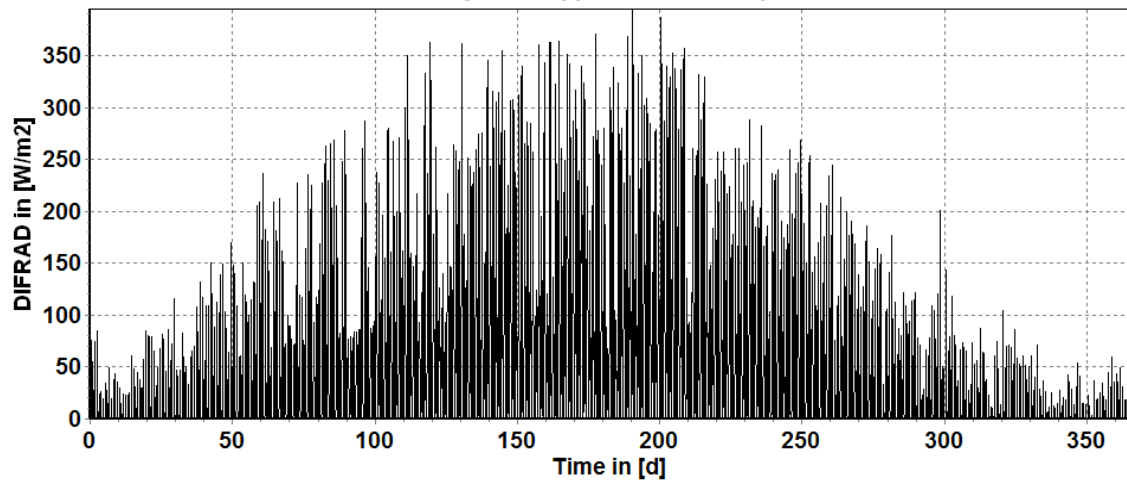


Kuva L4.7. Ulkoilman suhteellinen kosteus Jokioisissa 2050.

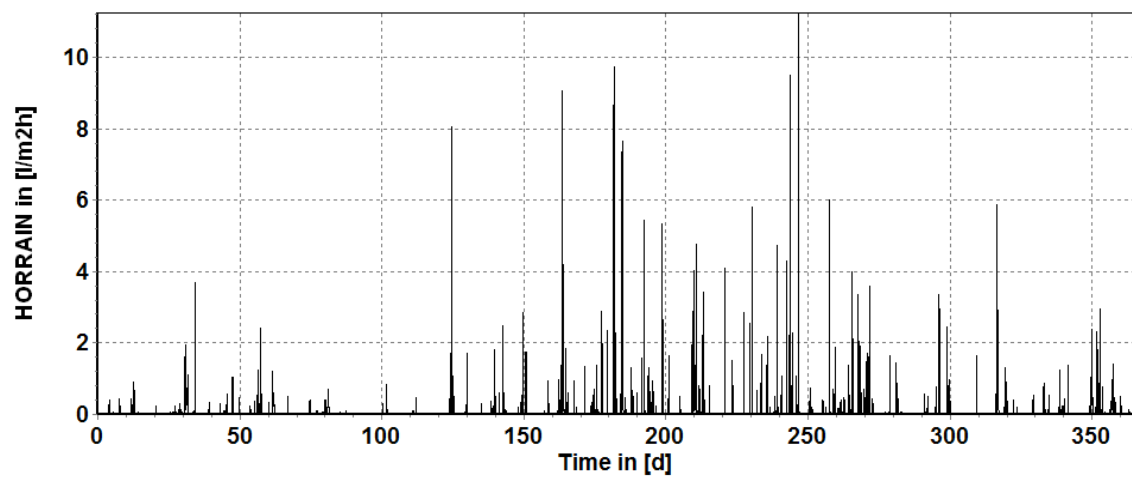


Kuva L4.8. Suoran auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2050.





Kuva L4.9. Diffuusin auringonsäteilyn määrä vaakapinnalle Jokioisissa 2050.



Kuva L4.10. Sateen kokonaismäärä vaakapinnalle Jokioisissa 2050.